POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

MONITORAGGIO SPAZIO-TEMPORALE MEDIANTE SENSORI MULTISPETTRALI DELL'EPIDEMIA DI *XYLELLA FASTIDIOSA* NELLA REGIONE PUGLIA

Relatore:

Prof. Ing. Piero Boccardo

Correlatore:

Ing. Giuseppe Mansueto

Candidata:

Sara Dell'Anna

Matricola n. 275724

Anno Accademico 2020/2021

‹‹È la Terra toa, amala e difendila››

A *Chi* mi ha insegnato ad amare questa Terra,

a *Chi* mi dà un buon motivo per difenderla ogni giorno

Indice

Abstract 14

1. Introduzione 16

2. Emergenza Xylella 20

2.1 Sindrome del disseccamento rapido dell'olivo (OQDS) 20

2.2 Diffusione della sindrome su scala regionale 24

2.3 Effetti negativi in termini economico-paesaggistici 29

3. Telerilevamento per l'agricoltura 32

3.1 Interpretazione dei segnali spettrali 32

3.2 Indici Vegetazionali (IV) 35

3.3 Uso dei dati da remoto per il monitoraggio della Xylella 41

4. Impiego di sensori multispettrali per l'analisi di oliveti colpiti da Xylella 45

4.1 Individuazione delle aree di interesse 45

4.2 Strumenti impiegati nella fase di acquisizione 66

4.3 Caratteristiche dei datasets 70

4.4 Metodologie impiegate nella fase di elaborazione 72

5. Analisi dei risultati 75

5.1 Risultati ottenuti dal primo campione di dati (immagini aeree) 75

5.2 Risultati ottenuti dal secondo campione di dati (immagini da UAV) 88

6. Ipotesi di riconversione dei terreni colpiti da Xylella 121

6.1 Sovrainnesto 122

6.2 Installazione di impianti fotovoltaici 125

6.3 Espianto e reimpianto di olivi 127

6.4 Diversificazione colturale 129

7. Conclusione e Sviluppi futuri 132

8. Bibliografia 136

Indice delle figure

Figura 2.1: Oliveto di Leccino (sullo sfondo) e una pianta di Ogliarola infetta (in primo piano). Fonte: *L'informatore agrario, 27-2017, p. 49* 23

Figura 2.2: Ciclo biologico della Sputacchina media. Fonte: *Infoxylella, Misure di contenimento e prevenzione, aprile 2021, p. 7* 24

Figura 2.3: Situazione regionale di diffusione della Xylella Fonte: *Infoxylella, Misure di contenimento e prevenzione, aprile 2021, p. 4* 27

Figura 3.1: Segnale spettrale di risposta della vegetazione. Fonte: https://physicsopenlab.org/2017/01/30/indice-ndvi/ 33

Figura 3.2: Riflettanza della vegetazione in diverse bande in funzione dello stato di salute. Fonte: https://physicsopenlab.org/2017/01/30/indice-ndvi/ 34

Figura 4.1: Individuazione delle aree di interesse su scala provinciale (Provincia di Lecce).....46

Figura 4.2: Individuazione delle aree di interesse su scala provinciale (Provincia di Brindisi) 47

Figura 4.3: Ortofoto 2019. Fonte: *PPTR Regione Puglia – Riprese AGEA* 49

Figura 4.4: Stato degli alberi d'olivo nell'area di interesse (Lecce) 50

Figura 4.5: Dettaglio dei polloni spondali presenti alla base degli olivi colpiti da Xylella (Lecce).....50

Figura 4.6: Ortofoto 2019. Fonte: *PPTR Regione Puglia– Riprese AGEA* 51

Figura 4.7: Stato degli alberi di olivo nell'area di interesse (Lequile).....52

Figura 4.8: Dettaglio albero di olivo nell'area di interesse (Lequile) 52

Figura 4.9: Dettaglio della Piana degli Ulivi Monumentali rispetto all'area di studio di Fasano. Fonte: *SIT, Regione Puglia* 54

Figura 4.10: Dati del monitoraggio 2020 (Fasano) Fonte: *SIT, Regione Puglia* 55

Figura 4.11: Stato degli alberi nell'area di interesse (Fasano, AOI1) 56

Figura 4.12: Dati del monitoraggio 2020 (Fasano) Fonte: *SIT, Regione Puglia* 57

Figura 4.13: Dati del monitoraggio 2021 (Fasano) Fonte: *SIT, Regione Puglia* 58

Figura 4.14: Dettaglio ramoscello area di interesse (Fasano, AOI2)..... 59

Figura 4.15: Dettaglio della Piana degli Ulivi Monumentali rispetto all'area di studio di Ostuni. Fonte: *SIT, Regione Puglia* 60

Figura 4.16: Alberi di olivo monumentali censiti presenti nell'area di studio (Ostuni, Brindisi) 60

Figura 4.17: Dati del monitoraggio 2018-2019 (Ostuni, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*..... 61

Figura 4.18: Dati del monitoraggio 2020 (Ostuni, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*..... 62

Figura 4.19: Dati del monitoraggio 2021 (Ostuni, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*..... 62

Figura 4.20: Stato degli alberi d'olivo presenti nell'area (sx) e dettaglio del ramo (dx) (Ostuni, Brindisi)..... 63

Figura 4.21: Rami insecchiti non potati (sx) e potati (dx), presumibilmente imputabili alla Xylella (Ostuni, Brindisi) 64
Figura 4.22: Dati del monitoraggio 2014 (San Pietro Vernotico, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia* 65
Figura 4.23: Stato degli alberi di olivo presenti nell'area (San Pietro Vernotico, Brindisi) 66
Figura 4.24: DJI Mavic 2 Pro.....67
Figura 4.25: Phantom 4 Multispectral impiegato nella fase di rilievo (sx) e dettaglio delle fotocamere (dx) 68
Figura 5.1: Confronto acquisizioni CIR 2016 (sx) e 2019 (dx) (Lecce, AOI1) 75
Figura 5.2: Confronto acquisizioni CIR 2016 (sx) e 2019 (dx) (Lequile, AOI2) 76
Figura 5.3: BNDVI AOI1, anno 2016 (Lecce) 77
Figura 5.4: Dettaglio chioma – BNDVI AOI1, anno 2016 (Lecce).....77
Figura 5.5: Dettaglio chioma immagine classificata – BNDVI calcolato per AOI1, anno 2019 (Lecce).....79
Figura 5.6: Dettaglio chioma immagine CIR – BNDVI AOI1, anno 2019 (Lecce) 80
Figura 5.7: Dettaglio chioma immagine CIR con poligoni – BNDVI AOI1, anno 2019 (Lecce).....80
Figura 5.8: Dettaglio chioma immagine RGB – BNDVI AOI1, anno 2019 (Lecce).....81
Figura 5.9: No-Fly Zone, AOI2 (Lequile) 84

Figura 5.10: Index Map OSAVI, AOI3 – DJI Terra 90

Figura 5.11: Index Map OSAVI, AOI13– Pix4D 91

Figura 5.12: Index Map OSAVI, AOI3 – ArcMap 91

Figura 5.13: Dettaglio chioma – Banda NIR, AOI3 92

Figura 5.14: Dettaglio chioma, GNDVI>0.65 (sx) – BNDVI>0.75 (dx), AOI3 94

Figura 5.15: Dettaglio chioma, ARVI>0.50 (sx) – OSAVI (dx)>0.25, AOI3 .. 94

Figura 5.16: AOI 6 96

Figura 5.17: GNDVI >0.65 – P1 (rosso) 30 m (sx) -70 m (dx), BNDVI >0.75 – P2 (verde) 30 m (sx) -70 m (dx) 98

Figura 5.18: ARVI >0.50 – P3 (rosa) 30 m (sx) -70 m (dx), OSAVI >0.25 – P4 (giallo) 30 m (sx) -70 m (dx) 98

Figura 5.19: GNDVI – P5 99

Figura 5.20: BNDVI >0.75 – P5 99

Figura 5.21: ARVI >0.50 – P5 99

Figura 5.22: OSAVI >0.25 – P5 99

Figura 5.23: GNDVI – P6 100

Figura 5.24: BNDVI >0.75 – P6 100

Figura 5.25: ARVI >0.50 – P6 100

Figura 5.26: OSAVI >0.25 – P6 100

Figura 5.27: GNDVI – P7 101

Figura 5.28: BNDVI >0.75 – P7 101

Figura 5.29: ARVI >0.50 – P7 101

Figura 5.30: OSAVI >0.25 – P7 101

Figura 5.31: GNDVI – P8 102

Figura 5.32: BNDVI >0.75 – P8 102

Figura 5.33: ARVI >0.50 – P8 102

Figura 5.34: OSAVI >0.25 – P8 102

Figura 5.35: AOI5, verifica degli output degli IV. 104

Figura 5.36: P9 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65 105

Figura 5.37: P9 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75 105

Figura 5.38: P9 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50 105

Figura 5.39: P9 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25 105

Figura 5.40: P13 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65 106

Figura 5.41: P13 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75 106

Figura 5.42: P13 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50 106

Figura 5.43: P13 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25 106

Figura 5.44: P13 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65 107

Figura 5.45: P13 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75 107

Figura 5.46: P13 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50 107

Figura 5.47: P13 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25 107

Figura 5.48: P12 - GNDVI >0.65, BNDVI>0.75 108

Figura 5.49: P12 – ARVI>0.50, OSAVI >0.25 109

Figura 5.50: AOI3, stato del monitoraggio visivo (in campo) e chimico (in laboratorio) (pre-aggiornamento del 4 novembre 2021)..... 110

Figura 5.51: P13 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65 111

Figura 5.52: P13 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75 111

Figura 5.53: P13 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50 111

Figura 5.54: P13 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25 111

Figura 5.55: P14 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65 112

Figura 5.56: P14 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75 112

Figura 5.57: P14 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50 112

Figura 5.58: P14 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25 112

Figura 5.59: P15 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65 113

Figura 5.60: P15 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75 113

Figura 5.61: P15 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50 113

Figura 5.62: P15 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25 113

Figura 5.63: Dettaglio olivo P14 – AOI3 114

Figura 5.64: GNDVI >0.65 (sx), BNDVI >0.75 (dx), P14..... 114

Figura 5.65: ARVI >0.50 (sx), OSAVI >0.25 (dx), P14 115

Figura 5.66: AOI3, stato del monitoraggio (post-aggiornamento del 4 novembre 2021) 117

Figura 5.67: Modalità di campionamento dei punti per un olivo potenzialmente sano 118

Figura 5.68: Modalità di campionamento dei punti per un olivo potenzialmente malato 118

Figura 6.1: Veduta satellitare del campo sperimentale di Presicce e codice numerico identificativo per 123

Figura 6.2: Innesto a pezza. Fonte: *Olivo e Olio, p. 4 Aprile 2017* 123

Figura 6.3: Innesto a marze. Fonte: *Teatro Naturale (rivista online), Luglio 2017* 124

Figura 6.4: Impianti fotovoltaici installati su oliveti colpiti da Xylella (Copertino, Lecce) 126

Figura 6.5: Reimpianto di olivi, varietà Leccino (Presicce, Lecce) 128

Figura 6.6: Reimpianto di olivi, varietà Fs-17 “Favolosa” (Presicce, Lecce). 128

Figura 6.7: Alberi di olivo colpiti da Xylella e alberi da frutto resistenti al batterio (Ortelle, Lecce) 129

Indice delle tabelle

Tabella 3.1: Elenco di indici di vegetazione (IV) proposti in letteratura Fonte: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111480. 36

Tabella 3.2: Interpretazione dell'indice NDVI nelle aree agricole. Fonte: *Agricolus* 37

Tabella 4.1: Caratteristiche immagini acquisite con DJI Mavic 2 Pro 49

Tabella 4.2: Caratteristiche tecniche DJI Mavic 2 Pro. Fonte: *https://www.dji.com/it/mavic-2/info* 67

Tabella 4.3: Caratteristiche tecniche Phantom 4 Multispectral. Fonte: *https://www.dji.com/it/p4-multispectral* 68

Tabella 4.4: Bande di acquisizione del sistema multispettrale integrato nel Phantom 4 Multispectral 69

Tabella 4.5: Caratteristiche tecniche immagini aeree 71

Tabella 4.6: Caratteristiche delle immagini acquisite con Phantom 4 Multispectral 72

Tabella 4.7: Calibrazione radiometrica – AOI 1 73

Tabella 5.1: Area degli elementi poligonali in cui l'immagine è stata classificata: Vegetazione (1), Ombre (10), Terreno (19) – AOI1, 2016 (Lecce) 78

Tabella 5.2: Area degli elementi poligonali in cui l'immagine è stata classificata: Porzione di chioma sana (1), altri elementi (19) – AOI5, 2019 (Lecce) 81

Tabella 5.3: Sintesi dei risultati ottenuti da immagini aeree 83

Tabella 5.4: Confronto valori soglia per gli IV del primo campione di dati e del secondo campione di dati 93

Tabella 5.5: Media dei valori di IV 118

Tabella 5.6: Mediana dei valori di IV 119

Tabella 6.1: Suddivisione delle risorse tra le annualità 2020-2021. Fonte: *Stralcio del D.L. 27/2019, art.2* 121

Indice dei grafici

Grafico 4.1: Calibrazione radiometrica, metodo Empirical Line – AOI 1.....73

Grafico 5.1: Confronto tra gli IV 83

Abstract

La Regione Puglia ed il Salento, in particolare, si sono ritrovati, colti di sorpresa, a dover affrontare l'epidemia di *Xylella Fastidiosa* che ha decimato nel giro di poco meno di 10 anni i milioni di olivi pugliesi: i danni sono stati irreparabili, non solo in termini economici, ma anche, e forse soprattutto, in termini culturali e paesaggistici. Isolato il batterio e identificato il veicolo di diffusione, restava da individuare la cura definitiva, che, però, ad oggi risulta ancora sconosciuta. Pertanto, la soluzione è stata quella di "tamponare", attraverso il monitoraggio, per tentare di contenere il fenomeno su larga scala. Il telerilevamento è parso essere, sin da subito, la chiave di lettura del problema e, in particolare, l'utilizzo di sensori ad infrarossi che catturano le radiazioni elettromagnetiche della regione non visibile dello spettro in cui le piante riflettono maggiormente.

È stato pertanto condotto un duplice studio volto alla quantificazione dei danni causati dalla malattia e al monitoraggio dei suoi effetti mediante sensore multispettrale al fine di individuare eventuali anomalie in olivi che non risultano essere sintomatici. La prima parte dell'analisi si è basata su un confronto multitemporale di immagini aeree su 2 oliveti in provincia di Lecce, ormai quasi completamente secchi: mediante il calcolo di indici vegetazionali, è stata determinata la percentuale di massa fogliare essiccata nel corso dei 3 anni. La seconda parte della ricerca è consistita nell'acquisizione diretta di dati, mediante un sensore multispettrale montato su un sistema UAV, su 4 oliveti in provincia di Brindisi, che presentano un differente stato sintomatico. Le analisi di calcolo eseguite sulla base di Indici Vegetazionali (IV), con GNDVI e BNDVI come migliori per l'identificazione degli effetti della malattia, hanno trovato riscontro nelle analisi di laboratorio: tale conferma ha portato ad affermare, senza dubbio, la validità dell'approccio impiegato volto a valutazioni speditive per individuare in una fase di screening preliminare "anomalie" da sottoporre ad indagini più approfondite.

Abstract (English version)

The Puglia Region and Salento, in particular, have been caught by surprise, founding themselves having to face the epidemic of *Xylella Fastidiosa* that has decimated, in less than 10 years, the millions of Apulian olive trees: the damage has been irreparable, not only in economic terms, but also, and perhaps above all, in cultural and landscape terms. Once the bacterium was isolated and the vehicle of diffusion identified, it remained to identify the definitive cure, which, however, to date is still unknown. Therefore, the solution was to "buffer", through monitoring, to try to contain the phenomenon on a large scale. Remote sensing seemed to be, right away, the key to understanding the problem and, in particular, the use of infrared sensors that capture electromagnetic radiation from the invisible region of the spectrum in which plants reflect most.

A two-pronged study was therefore conducted to quantify the damage caused by the disease and monitoring by means of a multispectral sensor in order to identify any anomalies in olive trees that are not symptomatic. The first part of the analysis was based on a multitemporal comparison of aerial images on 2 olive groves in the province of Lecce, now almost completely dry: by calculating vegetation indices, the percentage of dried leaf mass over the 3 years was determined. The second part of the research consisted in the direct acquisition of data, through a multispectral sensor mounted on a UAV system, on 4 olive groves in the province of Brindisi, which have a different symptomatic state. The calculation analyses carried out on the basis of Vegetation Indices (IV), with GNDVI and BNDVI as the best for the identification of the effects of the disease, have been reflected in laboratory analyses: this confirmation has led to affirm, without a doubt, the validity of the approach used aimed at expeditious evaluations to identify in a preliminary screening phase "anomalies" to be subjected to more in-depth investigations.

1. Introduzione

"*Ciò che è successo con il Coronavirus lo stavate osservando da tempo in Puglia?*" - "*Sì, le analogie sono moltissime (...) È incredibile come tutti i cliché a cui abbiamo assistito durante il Covid li avessimo già osservati nel caso della Xylella*". Quanto riportato è lo stralcio di un'intervista del 23 settembre 2021 di Enrico Ratto a Valentina Piccinni e Jean-Marc Caim, i due fotografi autori del progetto "This is my land", un lavoro sull'epidemia di Xylella nel Salento al quale hanno lavorato gli ultimi 6 anni.

Prima di addentrarsi nel vivo dell'attività e assumere un approccio squisitamente scientifico, è parso opportuno introdurre la questione da un punto di vista totalmente differente, non tecnico, per capire cosa la Xylella fastidiosa abbia significato e continui a significare per il Salento, epicentro della malattia, e per la regione tutta. E così, come l'arrivo del Coronavirus in Italia e l'annuncio di quello che avremmo imparato a chiamare "lockdown", lasciò tutti perplessi e sgomenti la sera del 9 marzo 2020, così l'epidemia di Xylella ha colto completamente di sorpresa la Puglia. Una regione che da sola rappresenta, in termini di ettari di oliveto, il 32% del patrimonio italiano, una terra che ha fatto dell'olivicoltura una delle attività produttive più capillarmente diffuse e fonte di lavoro, complice il clima arido delle lunghe estati mediterranee, ideale per le varietà di Ogliarola e Cellina di Nardò, e la natura calcarea del terreno che ha permesso di poter realizzare, nel sottosuolo dei centri abitati, frantoi ipogei (i cosiddetti "trappeti"), la cui pietra di risulta veniva poi magistralmente trasformata, spesso, nell'elegante barocco leccese o per la semplice costruzione di abitazioni, in un'ottica di riuso, di *circular economy*, come si direbbe oggi.

Ad oggi, alla luce di quanto accaduto in termini di Xylella e in analogia con quanto successo a causa del Coronavirus, è naturale porsi alcune domande, fare delle riflessioni. Forse se il problema fosse stato gestito sin dal primo momento in maniera attenta, senza nascondere o non comprendere la reale gravità

dell'iniziale epidemia, se non fosse stata messa in discussione la reale responsabilità del batterio contribuendo a dilatare i, già lunghi, tempi di intervento, probabilmente non ci ritroveremmo nel novembre del 2021 a dover fare i conti con 8 mila chilometri quadrati di oliveti dissecati e con il 40% del patrimonio olivicolo compromesso.

Oggi i risultati mostrano infatti che la prima introduzione in Salento di *Xylella fastidiosa subspecie pauca genotipo ST53*, probabilmente importata dal Sud America, si è avuta nel 2008 circa. Il caso "Xylella" è venuto alla ribalta però solo nel 2013, quando si sono iniziati ad avere i primi sintomi evidenti e diffusi nella zona di Gallipoli (Lecce) e limitrofe. Successivamente, complici diversi fattori, quali il clima, la numerosità di olivi e l'abbondanza di esemplari dell'insetto-killer, la malattia si è poi rapidamente estesa in tutto il territorio e, nonostante i trattamenti fitosanitari imposti e le eradicazioni che sono state eseguite, continuano ad essere scoperti nuovi focolai nella provincia di Bari a circa 150 km dall'epicentro.

In un primo momento la preoccupazione maggiore è stata quella di isolare il batterio e capire il motivo della rapida espansione nel territorio salentino; dopo aver determinato quale fosse la causa, grazie ad un'intuizione del Professor Giovanni Martelli, virologo e professore emerito dell'Università di Bari, ed aver individuato l'insetto veicolo, la cosiddetta Sputacchina, l'attenzione della comunità scientifica si è focalizzata sul come evitare il progredire della malattia o su come, per lo meno, rallentarla.

È pertanto iniziata una seconda fase di gestione dell'epidemia, divisa tra la sperimentazione e il monitoraggio. Per quanto riguarda la sperimentazione, anche in questo caso si è trattato di un percorso a step, come è naturale che sia dovendosi addentrare in un territorio del tutto sconosciuto: dai primi approcci "rudimentali", quali potare gli alberi, coprirli da reti per evitare l'ulteriore diffusione o trattarli con il caolino, per evitare l'eccessiva traspirazione delle

foglie, si è passati a metodi più "scientifici", come il reinnesto di varietà maggiormente resistenti e i trattamenti fitosanitari, oggi divenuti obbligatori.

Per quanto riguarda il monitoraggio, invece, è consistito sia in ispezioni in campo (monitoraggio visivo) sia in analisi eseguite in laboratorio. In questo scenario, il telerilevamento è sembrato, sin da subito, un utile strumento per poter direzionare le indagini dell'osservatorio fitosanitario pugliese e aiutare ad individuare nuovi focolai prima della comparsa di disseccamento.

Questa è stata l'idea alla base del presente lavoro, ovvero l'impiego di sensori multispettrali per il monitoraggio spazio-temporale dell'epidemia. L'obiettivo della dissertazione è stato duplice, ossia la quantificazione dei danni causati dalla malattia e il monitoraggio dei suoi effetti mediante sensore multispettrale al fine di individuare eventuali anomalie in olivi che non risultano essere sintomatici.

La Tesi è divisa in 8 capitoli: il primo è dedicato all'introduzione, il settimo alle conclusioni e ai potenziali sviluppi futuri del presente lavoro, l'ottavo alla bibliografia. Di seguito è brevemente descritto il contenuto dei restanti 5.

Nel secondo capitolo viene spiegata nel dettaglio, dal punto di vista chimico-biologico, la malattia, descrivendone la genesi in terra salentina, la diffusione a scala regionale e i danni collaterali legati non solo all'aspetto economico, ma anche a quello culturale e paesaggistico.

Il terzo capitolo dà uno sguardo generale sull'utilizzo dei sensori multispettrali in campo agricolo, impiegati soprattutto per l'agricoltura di precisione. Si riportano anche esempi di progetti finanziati dalla comunità europea in cui sono stati impiegati sensori iperspettrali al fine di identificare precocemente (early detection) gli effetti della malattia.

Il quarto capitolo è quello centrale: si esplicita il modo in cui si è cercato di raggiungere i 2 obiettivi che ci si era prefissati, quali sono state le ricerche condotte. Per quanto riguarda la prima parte dell'analisi, ovvero la

quantificazione dei danni, si è basata sullo studio di immagini aeree, acquisite sia nel visibile che nell'infrarosso (banda dello spettro elettromagnetico in cui la vegetazione riflette maggiormente e in relazione alla vigoria, quindi, utile per studi, quali questo, in cui si indaga circa lo stato di salute delle piante), di 2 oliveti in provincia di Lecce. Avendo a disposizione le immagini delle 2 aree sia nel 2016 che nel 2019 è stato condotto un confronto multitemporale volto alla determinazione della percentuale di massa fogliare essiccata nei 3 anni a causa della malattia, sulla base del calcolo di indici vegetazionali (IV). La seconda parte dello studio è stata eseguita analizzando un campione di dati acquisito in maniera diretta mediante sensore multispettrale montato su un sistema UAV su 4 oliveti in provincia di Brindisi. I 4 appezzamenti di terreno, al momento dei rilievi, presentavano un differente stato sintomatico. Anche in questo secondo caso, l'analisi è stata svolta in funzione di alcuni indici vegetazionali per i quali sono posti dei valori "soglia" che permettano di discretizzare tra porzione di "chioma sana" e "chioma potenzialmente malata", prescindendo dal fatto che il disseccamento sia visibile ad occhio nudo.

Il quinto capitolo è dedicato alla discussione dei risultati ottenuti sia dal primo campione di dati (immagini aeree) sia dal secondo (immagini da UAV). Si analizzano gli IV che hanno dato una risposta migliore e si commenta la bontà dei risultati ottenuti, confrontandoli con quelli che erano i risultati attesi e con l'evidenza della documentazione fotografica acquisita in campo. Si lascia spazio, alla fine, ad una breve conclusione circa l'efficacia della strumentazione impiegata, ossia dei sensori multispettrali.

Nel sesto capitolo è stata fatta una rassegna di quelle che sono state e/o continuano ad essere le ipotesi di riconversione dei terreni colpiti dalla malattia. È arrivato il momento di dare una seconda vita a quelle interminabili distese di terra rossa e fertile, pronta, anche lei, a ricominciare. "Ora serve un disegno. Un piano realizzabile di sviluppo agricolo. Basta con le scuse" – dice Enzo Manni, socio della Cooperativa ACLI di Racale, nel leccese – "E' tempo di dare una speranza concreta al Salento".

2. Emergenza Xylella

2.1 Sindrome del disseccamento rapido dell'olivo (OQDS)

È da quasi un decennio oramai che la provincia di Lecce, prima, e in generale la Regione Puglia, poi, si sono ritrovate, a dover fare i conti con un'epidemia che ha colpito questa Terra alla sprovvista, intaccandone un aspetto essenziale della sua identità: l'albero di olivo (*Olea europaea*) o ulivo, che dir si voglia.

Era il 2013 quando nei primi oliveti leccesi, nella zona di Gallipoli, si iniziò ad assistere al fenomeno del disseccamento delle piante, definito Complesso del disseccamento rapido dell'olivo (CoDi-RO), a causa della concomitanza di tre principali fattori che, in un primo momento, da indagini di campo e analisi di laboratorio, si pensava fossero i "responsabili" della sindrome, che colpiva (e colpisce) principalmente piante in età avanzata (Saponari et al., 2013; Nigro et al., 2013). Tale "complessità" è data dalla presenza di un batterio da quarantena (Xylella fastidiosa), localizzato nello xilema, e di un lepidottero (Zeuzera Pyrina), il cosiddetto rodilegno giallo, le cui larve scavano gallerie facilitando l'invasione del terzo reo, ovvero dei funghi lignicoli (Phaecremonium spp, Phaemoniella spp.).

Gli studi successivi, più approfonditi e robusti, essendo supportati, sfortunatamente, da un numero maggiore di campioni malati, hanno rivelato la quasi totale trascurabilità del secondo e del terzo fattore, a favore del ruolo eziologico determinante della Xylella fastidiosa; pertanto il nome con il quale era stato identificato il fenomeno in un primo momento, ha subito una variazione, trasformandosi in *Disseccamento rapido dell'olivo*, il cui acronimo OQDS deriva dalla traduzione inglese Olive Quick Decline Syndrome.

L'abbondanza di ulivi, circa 65 milioni in tutta la Puglia, di cui 11 solo nella penisola salentina, (Ubaldi, 2021), e le loro dimensioni (ben superiore alla media

europea sia per età sia perché molti di essi non vengono potati), la presenza massiva del vettore di questo batterio, la Sputacchina media (*Phalaenus spuamaris L.*), di cui si parlerà largamente in seguito, il clima temperato con inverni miti, quale quello salentino, che favorisce la crescita e la diffusione batterica, son stati alcuni dei fattori che hanno portato all'instaurazione dello stato di emergenza, un *unicum*, non solo a livello europeo, ma anche globale. (Strona et al., 2017).

Tenendo a mente quanto appena detto, risulta facile capire perché l'Italia, nelle vesti della parte meridionale della Regione Puglia, è stata la porta "ideale" attraverso la quale la Xylella ha fatto il suo ingresso Europa, per passare poi, con le varie subspecie, nei territori vicini quali quello francese, corso, spagnolo, portoghese; infatti mentre fino a qualche anno fa il batterio apparteneva alla lista A1 stilata dall'EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization) "comprendente gli organismi da quarantena assenti nel territorio EPPO", dal 2013 è stata posta nella lista A2, la quale fa riferimento a tutti gli organismi presenti nel vecchio continente e nel bacino mediterraneo.

L'unico studio relativo alla Xylella fastidiosa su olivi, antecedente al 2013, era stato condotto in California, dove Krunger et al. Avevano rinvenuto alcuni esemplari di alberi completamente dissecati; a seguito dell'esplosione dell'epidemia nel Sud Italia, sono state fatte delle indagini più accurate ed approfondite che hanno rivelato la presenza dello stesso batterio in alcune specie, similari all'olivo, in Brasile e in Argentina. In particolare, in Argentina, nella regione de La Rioja e di Cordoba, è stato riscontrato che il batterio attacca le piante di olivo più vetuste, con almeno 50 anni, ma non si limita solo a queste; infatti gli stessi sintomi sono stati rinvenuti in alberi di agrumi e mandorli (Haelterman et al., 2015).

Infatti, i primi focolai epidemici di Xylella si ebbero nella Contea di Orange, in California, nel 1887 e non riguardavano alberi di olivo, bensì vigneti. Nel corso degli anni, complice il diffondersi dell'infezione, si è tentato in diversi modi di

arginarne l'avanzata, ma ogni tentativo è risultato quasi vano (se non in termini di mero rallentamento): ad oggi, in molte contee della California del Sud la coltivazione della vite risulta praticamente preclusa. A seguito di questa prima segnalazione, nel secolo scorso sono state individuate altre specie ospite di Xylella fastidiosa, come il pesco, l'erba medica, l'olmo, il mandorlo, il platano occidentale, la quercia, gli agrumi, l'oleandro, il caffè, l'olivo (nel 2003, in California); si stima, ad oggi, un numero di piante in cui la Xylella può insediarsi e proliferare pari circa a 150, tra spontanee e coltivate.

In tale trattazione verrà approfondito il caso che costituisce un *unicum* (in termini estremamente negativi) tra tutti per via delle condizioni climatiche, della suscettibilità della specie ospite e dell'abbondanza nel territorio dell'insetto veicolo della malattia: l'epidemia che ha colpito 6 milioni e mezzo (dato aggiornato al 2021) di olivi pugliesi.

A supporto della tesi che vede la Xylella come responsabile unico, sono stati condotti test di patogenicità che hanno dimostrato la capacità di tale batterio di causare, in forma autonoma e indipendente dalla presenza di altre specie e/o da fattori esterni quali climatologici, il progressivo disseccamento con conseguente morte delle piante (Saponari et al., 2017), collocandosi in corrispondenza dei vasi xilematici e ostruendo il passaggio delle sostanze nutritive e di acqua dal tronco verso le estremità.

In aggiunta a questo, per fugare ogni tipo di dubbio relativo alla *colpevolezza* di tale batterio nella diffusione della sindrome, sono stati eseguiti dei test di monitoraggio dai ricercatori dell'Università di Bari Aldo Moro, in collaborazione con il CNR, l'Istituto per la protezione delle piante, l'Agenzia regionale per le attività irrigue e forestali, il Servizio fitosanitario della Regione Puglia, finanziati, in parte, grazie ai fondi europei del programma EU di ricerca e innovazione Horizon 2020 nell'ambito dei progetti Ponte (Pest organisms threatening Europe). I test sono stati effettuati in 11 comuni de leccese su 600 campioni, prelevati direttamente dalle chiome, di 3 differenti varietà di olivo

(Ogliarola Salentina, Cellina di Nardò, Leccino), che sono stati sottoposti ad una duplice analisi, sierologica (ELISA) e molecolare (PCR) per valutare il numero di positivi. Il secondo step prevedeva la quantificazione dell'avanzamento della malattia e quindi il numero di cellule batteriche, pertanto è stato calcolato un indice medio di assorbanza, espressa come densità ottica (OD) in nm, di cellule di Xylella sui tessuti dei campioni. I risultati ottenuti sono stati coerenti con gli studi precedenti (Giampetruzzi et al., 2016; Boscia et al., 2017) che avevano ampiamente dimostrato una resilienza e resistenza maggiore da parte delle piante di Leccino rispetto alle altre 2 cultivar suscettibili. Infatti mentre i 500 olivi di Ogliarola e Cellina presentavano più del 70% della chioma compromessa, a conferma di un certo stato di "maturità" della malattia, i 100 campioni di Leccino presentavano un disseccamento piuttosto lieve. (Boscia et al., 2017).

Figura 2.1: Oliveto di Leccino (sullo sfondo) e una pianta di Ogliarola infetta (in primo piano). Fonte: *L'informatore agrario, 27-2017, p. 49*

Questo studio non ha fatto altro che confermare la relazione biunivoca tra virus Xylella fastidiosa e sindrome OQDS, mettendo in luce la bontà e l'elevata sensibilità dei metodi diagnostici, PCCR in particolare. Tuttavia, i campionamenti sono stati effettuati in un'area già gravemente colpita, essendo il fine ultimo dello studio quello di verificare l'associazione patogeno-malattia. Ciò che generalmente ci si auspica, invece, con il monitoraggio è

l'intercettazione dei focolai nelle cosiddette zone cuscinetto al fine di minimizzare, ove possibile, il danno, rendendo efficaci le misure di abbattimento dei "positivi". In questo senso, la validità dei test sierologici e/o molecolari, eseguiti a seguito del sequenziamento del genoma dell'infezione, potrebbe perdere alcuni gradi di affidabilità, rendendo necessarie più analisi e un affinamento ad hoc delle metodologie per avere la certezza di lasciare in loco solo gli alberi *realmente* negativi, onde evitare di ricreare situazioni spiacevoli, pericolose e mai del tutto chiare, quale quella di Oria nel Brindisino (Martelli, 2017).

2.2 Diffusione della sindrome su scala regionale

Come già accennato in precedenza, una delle cause che spiega il perché della Regione Puglia in prima linea nella lotta contro la Xylella è dato dalla presenza in maniera significativa di un insetto, la Sputacchina media, che nutrendosi della linfa grezza degli olivi, acquisisce batterio e lo trasmette, divenendo in tal modo il principale, se non l'unico, vettore della malattia (Fonte*: Infoxylella, Misure di contenimento e prevenzione – Aprile 2021*).

La Sputacchina presenta una sola generazione all'anno e il ciclo biologico è descritto in Figura 2.2.

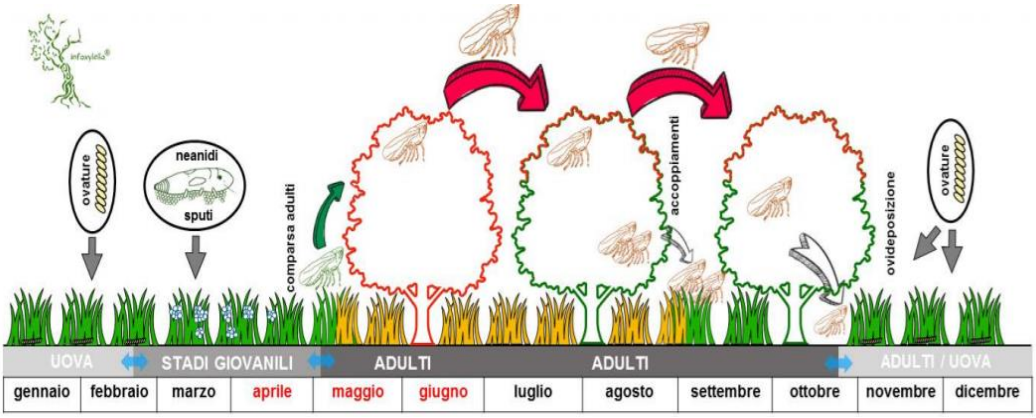


Figura 2.2: Ciclo biologico della Sputacchina media. Fonte: *Infoxylella, Misure di contenimento e prevenzione, aprile 2021, p. 7*

A seguito della deposizione e apertura delle uova, le neanidi ("primo stadio giovanile") colonizzano tantissime piante erbacee spontanee che offrono loro nutrimento e protezione per la crescita.

I "problemi", in termini di Xylella, iniziano a sorgere quando le neanidi, poco mobili e non responsabili della trasmissione del batterio, si trasformano in adulti, i quali volano e si spostano velocemente di pianta in pianta; se gli alberi e/o gli arbusti sono infetti, gli insetti acquisiscono il batterio e lo trasmettono per distanze significative. Alcuni studi svolti in collaborazione tra l'Università di Torino e di Brescia, il Centro ricerca e sperimentazione e formazione in agricoltura (CRSFA) di Locorotondo e l'Istituto protezione sostenibile delle piante (Ipsp) del Centro nazionale di ricerche (CNR) hanno dimostrato che un esemplare di sputacchina percorre in media, al giorno, distanze di 36 metri nell'oliveto e 35 metri su prato; è stato stimato che circa il 98% della popolazione si trova in un'area di influenza di 400 metri nell'intorno di un albero: questo ha inevitabilmente portato il Presidente di Coldiretti Puglia, Savino Muraglia, nell'agosto del 2020, a dichiarare "decisamente insufficiente" per il contenimento del contagio un'area buffer di 50 metri, soggetta a taglio obbligatorio, (dal Regolamento Comunitario, approvato il 14 agosto 2020) considerando che le distanze percorse in una stagione dall'insetto sono all'incirca maggiori di un ordine di grandezza.

A seguito della fase di sfarfallamento (tra aprile ed agosto), in concomitanza con l'accoppiamento e le prime piogge, i maschi ritornano al suolo e le femmine iniziano a depositare le uova: il freddo dei mesi invernali causa la morte degli adulti, preservando le nuove vite, che si schiuderanno nuovamente a partire da febbraio, garantendo in tal modo un nuovo ciclo annuale.

Non essendo ancora stata individuata una cura effettiva ed efficace per le piante affette da Xylella, le uniche 2 soluzioni risultano l'abbattimento delle piante infette (da effettuare a seguito di numerosi test sierologici e/o molecolari, come

visto in precedenza) e il controllo dei vettori per limitare la diffusione dell'epidemia.

Per quanto riguarda questo secondo aspetto, facendo riferimento al ciclo biologico (Figura 2.2) è facilmente intuibile il motivo per cui, accanto ai trattamenti che sono raccomandati per l'intero anno (potatura ordinaria, asportazione di pollini), si prediligono trattamenti specifici nei mesi di aprile, maggio, giugno. Le nuove misure di contenimento e prevenzione, definite nell'ambito del Piano d'azione 2021, pubblicato nel Bollettino ufficiale Regione Puglia (Burp) n.55 de 20.04.2021, impongono:

- sull'intero territorio regionale la lavorazione dei terreni (aprile/maggio) con trattamenti fisici e/o chimici al fine di eliminare la vegetazione erbacea;
- nelle zone di cuscinetto e contenimento (di seguito definite con maggiore grado di dettaglio), 2 trattamenti fitosanitari (maggio/giugno), con un intervallo di almeno 20-25 giorni, per poter eliminare l'eventuale popolazione sopravvissuta alla prima operazione.

Unitamente ai trattamenti fisici e chimici, la Coldiretti, sulla scia di uno studio realizzato in collaborazione dall'Università di Trento, il Mediterranean Agronomic Institute (CIHEAM) di Bari e la Fondazione Edmund Mach di San Michele all'Adige, ha proposto un nuovo metodo di contenimento della crescita della popolazione della Sputacchina media mediante la lotta biologica. È stato scoperto che alla base della riproduzione della specie vi è il "canto" tra il maschio che corteggia e la femmina che risponde, emettendo vibrazioni, solo quando nei loro ovari sono presenti le uova, a partire dal mese di agosto. Pertanto si tenta di interferire in questa fase, creando una sorta di "confusione sessuale vibrazionale", come è stata definita dagli esperti, col fine di ridurre le possibilità di accoppiamento.

Porre dei freni alla riproduzione dell'insetto vettore, mediante l'utilizzo di insetticidi o attraverso delle tecniche meno impattanti, quale quella appena citata, hanno aiutato a rallentare l'ulteriore diffusione del contagio che è passato dal viaggiare 25 km all'anno (tra il 2013 ed il 2015) a compiere tragitti medi di 2 km all'anno (ad oggi, 2021).

Figura 2.3: Situazione regionale di diffusione della Xylella Fonte: *Infoxylella, Misure di contenimento e prevenzione, aprile 2021, p. 4*

La Figura 2.3 è stata creata sulla base dei dati del monitoraggio e del Regolamento UE 2020/1201, che prevede la suddivisione del territorio regionale in aree ciascuna con differenti misure di contenimento e/o prevenzione. È possibile distinguere 5 zone:

1. Area indenne (in bianco), in corrispondenza delle province di Foggia, BAT, Bari (in parte), Taranto (in parte);
2. Area infetta (in rosso), in corrispondenza delle province di Lecce, Brindisi, Tarano (in parte) ed il Comune di Locorotondo. Solo in quest'area si contano 183mila ettari contaminati che ospitano 21 milioni di olivi infetti;

3. Zone di contenimento (in giallo): fascia di larghezza pari a 5 km, in cui è prevista l'eradicazione per sole piante risultate infette a seguito di analisi di laboratorio.
4. Zona cuscinetto (in blu): fascia di larghezza pari a 5 km, che prevede l'estirpazione di piante risultate infette a seguito di monitoraggio e di tutte le piante nel raggio di 50 metri indipendentemente dal loro stato sanitario;
5. Aree delimitate di Monopoli, Polignano, Canosa (M.P.C): i nuovi focolai rinvenuti nel 2020 hanno costretto ad applicare misure di eradicazione tanto nella zona infetta (50 metri) quanto in quella di contenimento (2.5 km);

Si vede chiaramente come orami la situazione sia abbastanza poco contenuta, soprattutto se si pensa che nell'ottobre del 2013 l'area infetta comprendeva esclusivamente il territorio leccese. Si è poi estesa alle provincie di Brindisi e Taranto, raggiungendo, all'inizio del 2018, i confini della provincia di Bari, rendendo necessaria una nuova demarcazione della zona infetta e una nuova delimitazione delle aree oggetto di misure di contenimento e delle zone cuscinetto.

La celere diffusione dell'epidemia è, senza dubbio, dovuta all'inesistenza di una vera e propria "cura", ma anche alle grandi distanze percorse dalla sputacchina. Infatti se si parla di distanze di circa 400 metri nei mesi di maggiore abbondanza, (Bodino et al., 2021), i numeri salgono in maniera significativa se gli insetti non viaggiano in maniera autonoma, ma sono "aiutati" da autoveicoli che permettono di percorrere tragitti nettamente maggiori.

Questo ha portato ad una repentina evoluzione del fenomeno, complici anche gli inverni piuttosto miti degli ultimi anni, che hanno consentito agli adulti di sopravvivere anche ai mesi teoricamente più freddi, andando ad incrementare le possibilità di contagio.

2.3 Effetti negativi in termini economico-paesaggistici

L'ulivo è uno degli elementi, assieme, ai muretti a secco e alla terra rossastra (ricca di idrossidi di ferro ed alluminio) che identifica la "pugliesità" nel mondo; fonte di riparo nelle torride estati e di lavoro e quindi sostentamento, per le tante famiglie che nei mesi di settembre ed ottobre si dedicavano (e continuano a dedicarsi, seppur in forme differenti ed in numeri, forzatamente, ridotti) alla raccolta delle olive. Ad oggi, secondo Coldiretti Puglia infatti, sono più di 5000 i posti di lavoro persi lungo la filiera dell'olio extra vergine di olivo che vedeva tutto il suo ciclo di produzione all'intero della Regione.

L'epidemia causata dalla Xylella fastidiosa, che da un decennio ormai si sta scagliando nel tacco della penisola, ha colpito al cuore i pugliesi tutti, che rivedevano nelle distese di ulivi millenari un simbolo, un'identità, che unisce ed unicizza.

Ed ovviamente ha avuto significativi impatti economici, non solo a livello locale, ma anche a livello europeo, se si pensa ad esempio che Italia, Spagna e Grecia, Paesi colpiti da Xylella (in forme differenti) soddisfano da sole il 95% della produzione olearia del continente (Eurostat, Agriculture, Forestry and Fishery Statistics, Luxembourg, 2016).

Recentemente è stato condotto uno studio in parallelo in Italia, Spagna e Grecia, volto a quantificare la magnitudo dei danni economici che si avrebbero nei prossimi 50 anni se l'epidemia continuasse ad espandersi in maniera indisturbata. L'analisi è stata fatta considerando 3 diversi scenari, o, con maggiore esattezza, considerando il 5°, il 50° e il 95° percentile della distribuzione tenendo in conto la variabilità della distribuzione spaziale della Xylella. I 3 indicatori valutano differenti situazioni, in un crescendo negativo, abbinate a differenti valori di espansione radiale annua: 1.10 km per il 5° percentile (RR05), 5.18 km per il 50°(RR50), 12.35 km per il 95° (RR95), che risulta pertanto descrive lo scenario peggiore e maggiormente impattante tanto

economicamente quanto ambientalmente. Le percentuali di territorio "infetto" variano in funzione del Paese: in Italia, per l'indicatore RR05, si stima una porzione di territorio malato, a largo spettro (50 anni), pari al 22%, per l'indicatore RR50 si considera circa il 50%, con l'RR95 si considera una percentuale di alberi infetti pari circa al 70%. (Schneider et al., 2020)

Gli impatti totali sono stati calcolati tenendo presente le due ipotesi *senza reimpianto* e *con reimpianto*. Nel primo caso il range, considerando i 3 differenti quantili (e, dunque, i 3 differenti "raggi d'azione"), varia da 1.9 a 5.2 miliardi di euro; nel secondo caso, naturalmente, l'impatto è significativamente minore, oscillando tra gli 0.6 e 1.6 miliardi di euro entro i prossimi 50 anni.

Il reimpianto, secondo quanto previsto dal Programma di sviluppo rurale Puglia 2014-2020 (con proroga al 30.11.2021, per via dei ritardi causati dall'emergenza sanitaria e dai rallentamenti imposti dal numero limitato di risorse), grazie a successive modifiche volte a garantire maggiore flessibilità, è possibile farlo su "terreni diversi da quelli oggetto di estirpazione", al fine di favorire l'operato delle aziende, principali vittime dell'epidemia, insieme ai piccoli agricoltori, che potranno scegliere luoghi idonei per ripristinare e incrementare la produttività. A seguito del reimpianto, finanziato in (piccola) parte con i contributi della Regione, grazie alla pubblicazione del nuovo decreto Mipaaf (Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali) del 14 luglio 2021, sarà compito degli agricoltori e/o delle aziende svolgere tutte le "azioni agronomiche e fitosanitarie per contenere la diffusione del batterio".

Da non sottovalutare sono ovviamente anche i danni a livello paesaggistico, culturale e turistico: infatti a causa della veloce virata verso Nord della malattia, è stata intaccata anche la "Piana degli ulivi monumentali". Essa si estende per 4 comuni e 2 province (Carovigno, Ostuni, Fasano e Monopoli) e comprende alberi millenari, si pensa risalenti al periodo dei Messapi (circa 3000 anni fa), che negli ultimi anni sono stati riscoperti da centinaia di turisti, interessati a prendere parte a percorsi studiati ad hoc che consentivano di passeggiare

all'ombra di chiome maestose e vetusti tronchi imponenti e di immergersi completamente nella cultura olearia pugliese attraverso visite a frantoi ipogei centenari disseminati per il territorio.

Tutti i milioni di alberi abbandonati a loro stessi, a causa delle poche (e talvolta inesistenti) risorse economiche messe a disposizione dalla Comunità Europea e dal Governo, sono la causa di numerosi e frequenti incendi che divampano nelle campagne pugliesi, e salentine in particolare, nei periodi estivi, a causa delle elevate temperature e della presenza di massa secca, tanto di ulivi quanto di sterpaglie. La Coldiretti parla di una "trasformazione del paesaggio lunare salentino in un girone dantesco dell'inferno", che ha bisogno di quantità di acqua ingenti (circa 300 litri di acqua su singolo albero) e di uomini e mezzi (vigili del fuoco e/o protezione civile) ben al di sopra, in termini quantitativi, di quelli messi a disposizione.

E il problema risulta più complesso del previsto quando vengono coinvolti nelle fiamme anche materiale plastico (come i tubi destinati all'irrigazione) e/o piccole discariche abusive, che creano nubi tossiche e pericolose data la vicinanza ai centri abitati.

È stata stilata dalla stessa Coldiretti, impegnata in prima linea in questa lotta di carattere tanto ambientale quanto culturale ed economico, una lista di comportamenti da adottare per minimizzare la quantità di incendi che risultano essere causati per la quasi totalità (95%) da comportamenti dolosi e rischiosi (Fonte: *Rapporto Ecomafia, 2021*). E, se per i primi, poco o nulla può essere fatto, se non in termini di sensibilizzazione, è necessaria la collaborazione di tutti, in particolare agricoltori e allevatori, che devono diventare sentinelle del territorio affinché possano in prima persona o tramite l'allertamento delle autorità competenti fare in modo che il problema incendi possa essere neutralizzato o, per così dire, "spento".

3. Telerilevamento per l'agricoltura

Negli ultimi anni, i tradizionali metodi di indagine del territorio, basati su monitoraggi strumentali e/o visivi, sono stati sostituiti, almeno in parte, con metodologie più sofisticate e meno onerose tanto in termini di tempo quanto di risorse economiche.

Tra queste alternative si è fatta strada quella del telerilevamento, che consente di acquisire mediante UAV e/o satelliti delle immagini del territorio, permettendo di avere un quadro d'insieme e di agire in modo distribuito nello spazio e nel tempo. È possibile, infatti, mediante questo strumento analizzare gli stress cui le singole piante sono sottoposte, minimizzare gli sprechi di acqua e nutrienti e massimizzare la produzione (agricoltura di precisione) in un'ottica volta alla sostenibilità.

3.1 Interpretazione dei segnali spettrali

A corredo della fase di rilievo, è necessaria la fase di fotointerpretazione, che attraverso l'elaborazione di segnali spettrali permette di avere il controllo da remoto dello scenario "fotografato".

La radiazione solare viene emessa con differenti lunghezze d'onda e frequenze; gli elementi naturali (vegetazione, acqua, nuvole, suolo) e antropici (edifici, capannoni) la assorbono e riemettono in diverse bande. Ad esempio:

- le *nuvole* o la *neve* appaiono bianche essendo completamente riflettenti nel visibile ($0.4\mu m<\lambda<0.7\mu m$), mentre sono totalmente (o quasi totalmente) assorbenti in alcune bande dell'infrarosso ($0.7\mu m<\lambda<14\mu m$);
- l'*acqua* è trasparente alle basse lunghezze d'onda del visibile, corrispondenti al blu-verde ($0.4\mu m<\lambda<0.6\mu m$), mentre è completamente assorbente nella regione dell'infrarosso;

- la *vegetazione* risulta avere un picco di assorbenza in corrispondenza della lunghezza d'onda associata al rosso (0.6μm<λ<0.7μm), mentre risulta avere un massimo relativo di riflessione nella regione del "verde" (0.5μm<λ<0.6μm) e un massimo assoluto nella regione del NIR (Near Infrared, 0.7μm<λ<1.3μm).

Si ritiene opportuno, data la tematica trattata e data la complessità dello spettro della vegetazione ("segnale spettrale per eccellenza", Figura 3.1), spiegarne di seguito il profilo con maggior grado di dettaglio.

BNDV

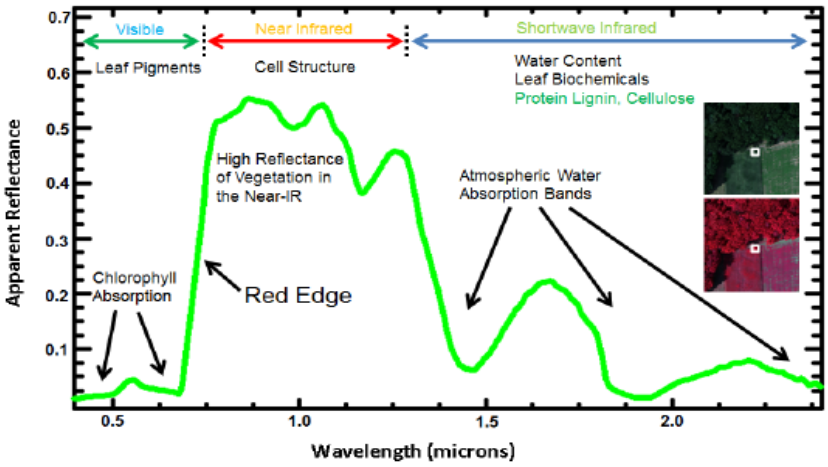


Figura 3.1: Segnale spettrale di risposta della vegetazione. Fonte: https://physicsopenlab.org/2017/01/30/indice-ndvi/

La forma dello spettro dipende da 3 fattori: i pigmenti contenuti nella foglia, la struttura della stessa e il contenuto d'acqua.

I pigmenti presenti nella pianta sono essenzialmente clorofilla (65%), xantofille e carotene. La clorofilla ha bisogno di energia per attivare il processo di fotosintesi e non potendola trarre dalla "banda verde" dello spettro, in corrispondenza della quale le foglie risultano essere opache (coefficiente di trasmissione τ=0), la ricava dalle "bande" blu e rossa: ciò spiega i massimi di assorbenza, relativi e assoluti, (o minimi, in termini di riflessione) che si

registrano in corrispondenza di tali lunghezze d'onda. Xantofille e carotene sono invece responsabili dei toni giallo-arancio delle foglie che risultano avere carenza o assenza di clorofilla.

La struttura della foglia è, invece, responsabile del comportamento nelle bande del NIR. La radiazione relativa alla prima regione dell'infrarosso, infatti, non interagisce con i pigmenti ma è influenzata dall'organizzazione delle cellule fogliari, in funzione della quale si ha una riflessione pari al 30-70% dell'energia totale: è l'unica superficie ad avere una percentuale così alta in questa banda spettrale. L'indice di riflessione (ρ) più alto, nel range del NIR, è associato proprio all'albero di ulivo, che risulta avere un valore limite pari a 0.8. Indagare quest'indice è di estrema importanza nell'ambito del telerilevamento in quanto permette di discriminare differenti specie e di analizzare lo stato evolutivo e di salute delle singole piante (Figura 3.2). Una pianta sana, infatti, ha un assorbimento elevato in corrispondenza delle lunghezze d'onda associate al blu e al rosso, mentre risulta riflettere nel campo del verde e, soprattutto, dell'infrarosso.

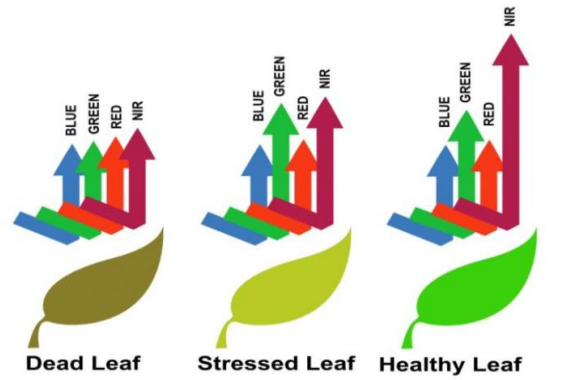


Figura 3.2: Riflettanza della vegetazione in diverse bande in funzione dello stato di salute. Fonte: https://physicsopenlab.org/2017/01/30/indice-ndvi/

Nel range delle Short-Wave Infrared (SWIR, 1.4μm<λ<2.7μm), il segnale spettrale dipende fortemente dal contenuto d'acqua presente nelle foglie. Infatti, i picchi di assorbenza che si registrano a 1.4μm, 1.9μm, 2.6μm sono legati

all'assorbimento della radiazione da parte dell'acqua; allo stesso modo, i massimi di riflessione che si leggono, sullo spettro, a 1.65µm e 2.2µm sono parzialmente influenzati dal contenuto idrico.

Pertanto, a fronte di quanto appena visto con riferimento allo spettro della vegetazione, è possibile concludere dicendo che è sufficiente analizzare il segnale di risposta nel campo del visibile e dell'infrarosso per poter discriminare, almeno a livello di genere, la copertura vegetale del terreno.

3.2 Indici Vegetazionali (IV)

L'interpretazione dei segnali spettrali, in funzione dell'indice di riflessione in corrispondenza del range visibile-infrarosso, permette di dare origine a diversi indici di vegetazione (IV) attraverso delle combinazioni matematiche (Cao et al. 2015). Tali indici permettono di ridurre alcuni disturbi dovuti alla fase di rilievo (come distorsione geometrica delle immagini, instabilità radiometrica dei sensori, affetto atmosferico e quello topografico) (Maselli, 2006) ed evidenziano specifici stress della pianta, permettendo il controllo da remoto dello stato di salute della stessa e, di conseguenza, delle sue necessità, in termini di acqua, nutrienti e concimi.

In Tabella 3.1 sono presenti alcuni tra i più comuni indici di vegetazione proposti in letteratura. Di seguito si riportano quelli presi in considerazione nel presente lavoro, calcolati combinando una o più bande del visibile (Red-Green-Blue) con l'infrarosso vicino (NIR).

Vegetation index	Equation
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670})$
Chlorophyll Index	$CI = \frac{R_{750}}{R_{710}}$
Normalized Difference Index	$NDI = (R_{706} - R_{664})/(R_{704} + R_{664})$
MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$MTCI = (R_{754} - R_{709})/(R_{709} - R_{681})$
Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index	$MCARI = ((R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}))\left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = (R_{800} - R_{550})/(R_{800} + R_{550})$
Pigment Specific Simple Ratio A	$PSSRa = \frac{R_{800}}{R_{680}}$
Sentinel-2 Red-Edge Position	$S2REP = 705 + 35\frac{\frac{R_{783} + R_{665}}{2} - R_{705}}{R_{740} - R_{705}}$
Inverted Red-Edge Chlorophyll Index	$IRECI = (R_{783} - R_{665})/(R_{705} + R_{740})$
Renormalized Difference Vegetation Index	$RDVI = (R_{800} - R_{670})/\sqrt{(R_{800} + R_{670})}$
Modified Simple Ratio	$MSR = \frac{R_{800}/R_{670} - 1}{(R_{800}/R_{670})^{0.5} + 1}$
Transformed Chlorophyll Absorption Ratio	$TCARI = 3\left((R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	$OSAVI = (1 + 0.16)\frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.16}$
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = (1 + L)\frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + L}$
TCARI/OSAVI	$TCARI/OSAVI = \frac{TCARI}{OSAVI}$
Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 1510	$MCARI1510 = ((R_{700} - R_{1510}) - 0.2(R_{700} - R_{550}))\left(\frac{R_{700}}{R_{1510}}\right)$
Transformed Chlorophyll Absorption Ratio 1510	$TCARI1510 = 3\left((R_{700} - R_{1510}) - 0.2(R_{700} - R_{550})\frac{R_{700}}{R_{1510}}\right)$
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index 1510	$OSAVI1510 = (1 + 0.16)\frac{R_{800} - R_{1510}}{R_{800} + R_{1510} + 0.16}$
Red Green Ratio Index	$IRG = R_{670} - R_{550}$
Perpendicular Vegetation Index	$PVI = \frac{R_{800} - a \cdot R_{670} - b}{\sqrt{a^2 + 1}}$
Ratio Vegetation Index - Simple Ratio 800/670	$RVI = \frac{R_{800}}{R_{670}}$
Adjusted Transformed Soil-Adjusted VI	$ATSAVI = a \cdot \frac{R_{800} - a \cdot R_{670} - b}{a \cdot R_{800} + R_{670} - ab + x(1 + a^2)}$
Atmospherically Resistant Vegetation Index	$ARVI = \frac{R_{800} - R_{670} - y(R_{670} - R_{450})}{R_{800} + R_{670} - y(R_{670} - R_{450})}$
Global Environment Monitoring Index	$GEMI = n(1 - 0.25n)\frac{R_{670} - 0.125}{1 - R_{670}}$ $n = \frac{2(R_{800}^2 - R_{670}^2) + 1.5 \cdot R_{800} + 0.5 \cdot R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.5}$
Difference Vegetation Index	$DVI = g \cdot R_{800} - R_{670}$
Aerosol Free Vegetation Index 1600	$AFRI1510 = R_{800} - 0.66\frac{R_{1600}}{R_{800} + 0.66 \cdot R_{1600}}$
Aerosol Free Vegetation Index 2100	$AFRI2100 = R_{800} - 0.5\frac{R_{2100}}{R_{800} + 0.56 \cdot R_{2100}}$

Tabella 3.1: Elenco di indici di vegetazione (IV) proposti in letteratura Fonte: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111480.

NDVI

Senza dubbio, il più noto e di uso comune è l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974) che descrive il livello di

vigoria della coltura e si calcola come il rapporto tra la differenza delle radiazioni riflesse nell'infrarosso e nel rosso e la loro somma:

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

Il valore di tale indice oscilla tra -1 ed 1: i valori negativi sono tipici di corsi d'acqua, area urbane, mentre i valori positivi fanno riferimento ad un campo agricolo. Ad un valore più alto del parametro, corrisponde un migliore stato di salute (vigore) della pianta, in quanto ad esso è associata una maggiore capacità di riflettere la radiazione solare nell' infrarosso (Figura 3.2).

In Tabella 3.2 è riportata la corrispondente situazione agronomica per ciascun range.

NDVI	INTERPRETAZIONE
<0.1	Suolo nudo o nuvole
0.1 – 0.2	Copertura vegetale quasi assente
0.2 – 0.3	Copertura vegetale molto bassa
0.3 – 0.4	Copertura vegetale bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0.4 – 0.5	Copertura vegetale medio-bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0.5 – 0.6	Copertura vegetale media con vigoria bassa o copertura vegetale medio-bassa con vigoria alta
0.6 – 0.7	Copertura vegetale medio-alta con vigoria bassa o copertura vegetale media con vigoria alta
0.7 – 0.8	Copertura vegetale alta con vigoria alta
0.8 – 0.9	Copertura vegetale molto alta con vigoria molto alta
0.9 – 1	Copertura vegetale totale con vigoria molto alta

Tabella 3.2: Interpretazione dell'indice NDVI nelle aree agricole. Fonte: *Agricolus*

BNDVI

Il Blue Normalized Vegetation Index (Wang Fu-ming et al.) mette in relazione la banda del NIR e quella del blu. Ne è stata dimostrata l'utilità per l'analisi di aree sensibili al contenuto di clorofilla. È un indice poco comune ed uno studio ne ha attestato la bontà nel monitoraggio di Xylella (Galvàn Fraile, 2020).

$$BNDVI = \frac{NIR-BLUE}{NIR+BLUE}$$

GNDVI

Il Green Normalized Difference Vegetation Index (Gitelson et al., 1996) si calcola come l'NDVI visto precedentemente, ma, a differenza di quest'ultimo, mette in relazione la banda del NIR con quella del verde, le due bande, in assoluto, in cui la vegetazione riflette maggiormente. È stato dimostrato che il GNDVI è più sensibile al contenuto di clorofilla rispetto all'NDVI, in quanto la banda del verde risulta maggiormente efficiente di quella del rosso nell'individuare la presenza di nitrogeno, strettamente connessa alla clorofilla. (Dimitris Sykas, 2021)

$$GNDVI = \frac{NIR-GREEN}{NIR+GREEN}$$

SAVI

Una versione modificata dell'NDVI è il SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), (Huete ,1988), che permette di introdurre una correzione tenendo conto del suolo nudo. Questo indice risulta essere utile nel momento in cui si vogliono confrontare terreni che hanno una copertura vegetativa bassa (<40%), il cui suolo, riflettendo, potrebbe influenzare significativamente i valori di riflettanza nel rosso e nell'infrarosso modificando i valori di NDVI. Dal punto di vista matematico, pertanto, l'espressione del SAVI è simile a quella dell'NDVI, con l'aggiunta di un fattore di correzione della luminosità del suolo L che varia da 0

(aree a elevata copertura vegetale, equivalente al metodo NDVI) a 1 (aree senza copertura vegetale).

$$SAVI = \frac{(NIR - RED) * (1 + L)}{NIR + RED + L}$$

Nell'elaborazione dei dati, tenendo conto della copertura vegetale media di un oliveto tradizionale (escludendo, pertanto, i campi intensivi) è stato posto un valore di L pari a 0.5 per entrambe le aree.

Nella versione del SAVI "ottimizzata" proposto da Rondeaux et al. (1996) (OSAVI), L ha valore di 0.16.

MSAVI

L'espressione matematica per il calcolo del Modified Soil-Adjusted Vegetation Index è identica a quella appena vista per il SAVI, la differenza sta nel modo in cui il parametro L è determinato. Infatti, mentre per il SAVI esso è funzione della copertura vegetale del suolo, nel caso del MSAVI L è calcolato come coefficiente angolare della "soil-line" identificata nel grafico che ha per ascissa i valori di riflettanza nella Red Band e per ordinata i valori di riflettanza nel NIR.

A partire da questa complessa espressione, Qi et al., nel 1994, hanno proposto una versione più semplificata che elimina la necessità di identificare la cosiddetta "soil-line". Questa seconda formula, che restituisce il MSAVI2, è quella più comunemente impiegata.

$$MSAVI2 = \frac{2\,NIR + 1 - \sqrt{(2\,NIR + 1)^2 - 8\,(NIR - RED)}}{2}$$

ARVI

L'Atmospherically Resistant Vegetation Index (Bannari et al., 1995), così come l'NDVI, valuta lo stato di salute della pianta, e, a differenza di questo, permette di minimizzare gli effetti dello scattering atmosferico, legato all'aerosol.

$$ARVI = \frac{NIR - RED + \gamma(BLUE - RED)}{NIR + RED - \gamma(BLUE - RED)}$$

Il parametro γ dipende dal tipo di aerosol atmosferico presente, tuttavia quando non è disponibile un modello di aerosol di riferimento, si ritiene opportuno porre γ=1. L'espressione sopra si semplifica come segue:

$$ARVI = \frac{NIR - (2 * RED) + BLUE}{NIR + (2 * RED) - BLUE}$$

CI_{green}

Il Chloriphyll Index Green (Zarco-Tejada et al., 2001) permette di avere una stima del contenuto di clorofilla a livello di chioma, che a sua volta è un indicatore dello stato di salute della pianta. Un valore basso di tale indice è sintomatico di stress ambientali e/o carenze legate ai nutrienti, alla stagionalità, all'uso di pesticidi.

$$CI_{green} = \frac{NIR}{GREEN} - 1$$

TVI

Il Triangular Vegetation Index (Broge and Leblanc, 2000) viene così chiamato perché si basa sulla triangolazione dello spazio spettrale tra il picco della riflettanza associata alla banda del verde, il minimo dell'assorbimento di clorofilla e la spalla del NIR. L'area del triangolo ideale aumenta all'aumentare

dell'assorbimento di clorofilla e del tessuto fogliare che comporta un aumento della riflettanza nel NIR.

$$TVI = 0.5 * [1.2\,(NIR - GREEN)] - 200\,(RED - GREEN)$$

MTVI2

Il Modified Triangular Vegetataion Index (Haboudane et al., 2004) ha come scopo la valutazione del contenuto di clorofilla a livello della chioma. È simile al TVI, ma si ritiene sia un indicatore migliore dell'area fogliare (Leaf Area Index).

$$MTVI2 = \frac{1.5\,[1.2(\,NIR - GREEN) - 2.5\,(RED - GREEN)]}{\sqrt{(2\,NIR + 1)^2 - \left(6NIR - 5\sqrt{RED}\right) - O.5)}}$$

MCARI1

Anche il Modified Chloropjyll Absorption in Reflectance Index (Haboudane et al., 2004) è connesso al contenuto di clorofilla assorbito dalle foglie e, pertanto, è sensibile alle sue variazioni di concentrazione ed è legato alla superficie fogliare.

$$MCARI1 = 1.2\,[2.5\,(NIR - RED) - 1.3\,(NIR - GREEN)$$

3.3 Uso dei dati da remoto per il monitoraggio della Xylella

Come già sottolineato in precedenza, ad oggi, non esiste una cura efficace contro questa epidemia dilagante; gli unici mezzi a nostra disposizione per impedire e limitare il rischio contaminazione sono l'eradicazione degli alberi risultati infetti a seguito di analisi di laboratorio e strategie di controllo della diffusione dell'insetto vettore, la Sputacchina media. Tali misure risulterebbero più

efficaci, qualora la malattia venisse intercettata e stroncata (mediante eradicazione) sin dai primi stadi, evitando in tal modo la diffusione del batterio vettore nelle piante circostanti; tuttavia questo avviene di rado a causa del numero ingente di alberi da dover tenere sotto controllo e delle reali difficoltà nell' individuare la malattia agli arbori.

È per questo che entra in gioco il telerilevamento che ha ormai soppiantato i vecchi metodi tradizionali, rivelandosi un'ottima soluzione ed un reale aiuto nell'individuazione delle piante malate attraverso una diagnosi precoce, andando a valutare lo stress idrico e nutrizionale causato dall'ostruzione dei vasi xilematici o altri fattori contingenti.

Uno dei primissimi studi, in questo settore, condotto nell'ambito dei due progetti finanziati dalla comunità europea, PO-nTE e XF-ACTORS, è stato presentato nel Novembre del 2017 (Zarco-Tejada et.al, 2018. *Previsual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations*), in occasione della Conferenza internazionale su Xylella Fastidiosa, tenutasi a Palma di Maiorca, in Spagna, a seguito di una campagna biennale di ricerche condotta in collaborazione con Istituto de Agricultura Sostenible – Consejo Superior de Investigaciones Cientificas di Cordoba, Swansea University, Karlsruge Institute of Technology, Università degli Studi di Bari e il Joint Research Center della Commisione Europea. Sono stati posti sotto osservazione circa 200 000 alberi di olivo nella zona del leccese (area di circa 3 000 ettari) mediante l'utilizzo di camere spettroscopiche ad alta risoluzione (iperspettrali) e termiche con una risoluzione spaziale di 40 cm e 60 cm rispettivamente. Le immagini, acquisite ad un'altezza di 500 m rispetto al piano campagna, sono state interpretate mediante il metodo di segmentazione che ha permesso di estrarre gli spettri di temperatura, radianza e riflettanza per ciascuna chioma, la quale è stata, in fasi successive, isolata, cercando di minimizzare gli errori derivanti dal background e/o dall'overlapping. Sono stati, quindi, calcolati degli indici spettrali legati ai pigmenti delle foglie (clorofilla, carotene, xantofille) che potessero essere indicatori precoci della malattia.

Dalle analisi computazionali svolte è emerso che:

- I valori di riflettanza associati alla banda del blu sono quelli maggiormente influenzati dalle alterazioni legate allo stadio in cui i sintomi non sono visibili ad occhio nudo (early detection) o la malattia è in una fase iniziale. L'indice calcolato, associato alle bande spettrali pari a 415 e 435 nm, è un indicatore della degradazione di clorofilla e, di conseguenza, è risultato sensibile al monitoraggio della Xylella. Si tratta del Normalized Phaeophytinization Index (NPQI) (Barnes et al., 1992).

- La Solar Induced Fluorescence (SIF) e il Crop Water Stress Index (CWSI) hanno mostrato risultati statisticamente significativi ai fini dell'early detection. L'indice SIF (Grace et al., 2007; Hilker et al., 2008) è calcolato sulla base dei valori di radianza misurati dai sensori iperspettrali, mentre l'indice CWSI (Barnes et al., 2000) è valutato mediante camere termiche, in funzione della differenza di temperatura tra la chioma e l'aria circostante.

Le analisi hanno, pertanto, confermato la bontà e l'efficacia del metodo, rilevando la presenza del batterio anche quando ad occhio nudo non vi era alcun sintomo evidente; tutti i risultati sono stati ovviamente a posteriori supportati e verificati attraverso rilievi visivi e strumentali periodici fatti direttamente in campo, su un campione di circa 7 000, distribuiti in 15 oliveti, che hanno confermato l'attendibilità del metodo (Fonte: *Ricerca europea su Xylella fastidiosa*, Contributi dei progetti PO-nTE e XF-ACTORS). Tale risultato ha segnato un grande passo avanti nella lotta epidemiologica configurandosi come un grande vantaggio "*agli sforzi di sorveglianza delle aree esenti dal batterio (...), consentendo un più rapido ricorso a strategie di prevenzione e sforzi di contenimento della sua espansione come negli auspici della Commissione Europea*", come ha sottolineato il Dottor Donato Boscia (ricercatore presso l'Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante del Cnr di Bari), a corredo

della pubblicazione dello studio sopra citato (*Previsual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations*) di cui egli stesso è co-autore.

Valorizzando i risultati di tale studio scientifico, nel Giugno del 2020, è stato presentato un nuovo progetto, *Redox* (Remote Early Detection of Xylella), coordinato dal Distretto tecnologico aerospaziale (DTA), in collaborazione con il Cnr, l'Enav e Planetek e finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico. Lo scopo del progetto, anche in questo caso, è l'identificazione di una diagnosi precoce, mediante l'utilizzo di sensori iperspettrali montati su satelliti, aereo o sistemi UAV, al fine di bloccare la diffusione del batterio nella pianta infetta e in quelle circostanti prima che i sintomi siano evidenti ad occhio nudo. A fronte delle centinaia di chilometri quadrati che vengono ad oggi monitorati, questo sistema permette di controllare migliaia di chilometri quadrati e di elaborare e archiviare i dati mediante un software ideato dalla stessa Planetek, ottimizzando tempi e costi, tanto di monitoraggio quanto di campionamento.

4. Impiego di sensori multispettrali per l'analisi di oliveti colpiti da Xylella

Si è deciso, in questa sede, di impiegare gli strumenti di telerilevamento e, in particolare, i sensori multispettrali montati su UAV per poter svolgere un'analisi qualitativa che valutasse la risposta, nello spazio e nel tempo, di oliveti pugliesi colpiti e non dal batterio.

4.1 Individuazione delle aree di interesse

L'indagine è stata svolta avvalendosi di 2 campioni di dati: il primo dataset è stato ottenuto in maniera indiretta da immagini aeree (Area di interesse (AOI) 1, AOI 2) (Figura 4.1), mentre il secondo è stato acquisito in maniera diretta grazie a due rilievi eseguiti in campo (AOI 3, AOI 4, AOI 5, AOI 6) (Figura 4.2).

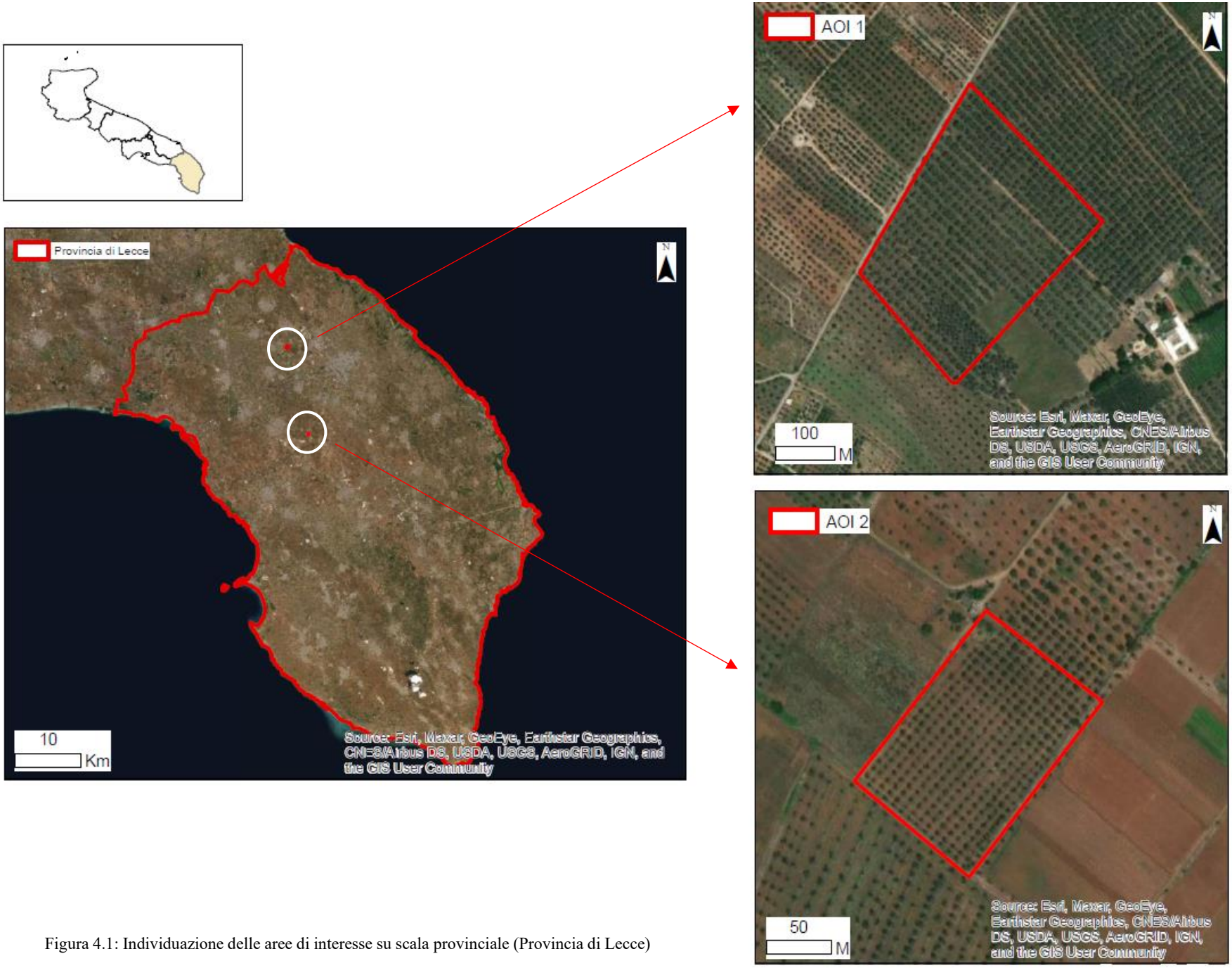


Figura 4.1: Individuazione delle aree di interesse su scala provinciale (Provincia di Lecce)

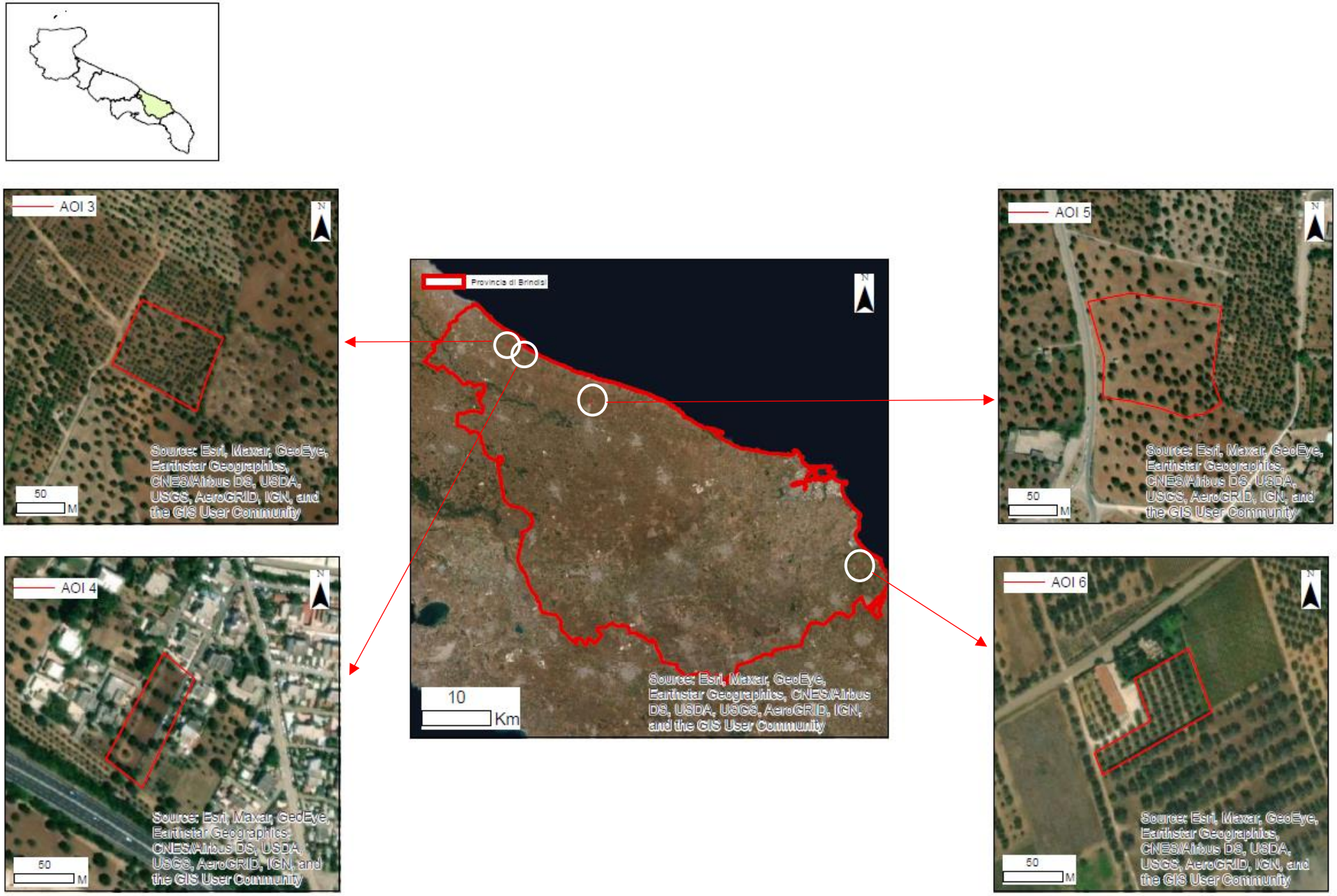


Figura 4.2: Individuazione delle aree di interesse su scala provinciale (Provincia di Brindisi)

Il primo campione di dati si basa su acquisizioni aeree, gentilmente fornite dalla CGR Spa (Compagnia Generale Ripresearee), effettuate negli anni 2015 (30/05-2/06), 2016 (7/05-25/05-26/05-18/06) e 2019 (24/07). Tutti e 3 i periodi sono a valle della fioritura che avviene (Xylella fastidiosa permettendo) generalmente intorno al periodo di aprile-maggio, quando le temperature diurne si aggirano intorno ai 20-25°C, si ha una ventosità diffusa e costante e poca pioggia; pertanto l'allineamento, per lo meno in termini di infiorescenza, ha permesso un confronto nei diversi anni.

Volendo dunque fare un'analisi multi temporale che permettesse di individuare l'indice maggiormente adatto per discriminare tra un uliveto infetto ed uno sano, la scelta delle aree di interesse non poteva che ricadere nella provincia di Lecce, prima tra tutte ad aver assistito alla comparsa e alla diffusione "a macchia d'olio" (letteralmente parlando) dell'epidemia. Si precisa che in nessuna delle due aree sono stati eseguiti campionamenti, tuttavia, data la posizione e il periodo in cui gli olivi hanno iniziato a presentare i sintomi, si può affermare con una certa sicurezza che la causa sia rintracciabile nella Xylella fastidiosa.

Per ciascuna area e per ognuno dei 3 anni, sono state acquisite due ortofoto: un'immagine ottica, basata sulla combinazione delle tre bande del visibile (Red-Green-Blue), ed un'immagine "CIR" (Color-Infrared, *si veda paragrafo 5.3*), che si basa sulla combinazione del Near Infrared (NIR), del Rosso e del Verde.

A seguito dell'analisi computazione eseguita sulle immagini aeree, è stato ritenuto opportuno eseguire in sito una documentazione fotografica aerea mediante UAV (si veda Paragrafo 4.2), per l'AOI1 e da terra per l'AOI2 per poter confermare la bontà dei risultati.

Per l'area di Lequile (AOI 2) non è stato possibile impiegare l'UAV per la documentazione essendo questa una zona no fly, data la vicinanza all'aeroporto militare di Galatina. I risultati ottenuti in fase di processamento sono stati supportati con rilievo fotografico da terra.

In Tabella 4.1 si riportano le specifiche delle immagini acquisite.

	AOI 1	AOI 2
Data di acquisizione	29/10/2021	-
Ora di acquisizione	12.00	-
Direzione di volo	Nadirale	-
Altezza di volo	30	-

Tabella 4.1: Caratteristiche immagini acquisite con DJI Mavic 2 Pro

Area 1: Lecce

La 1° area di interesse si trova nel comune di Lecce (Foglio 169, particella 24).

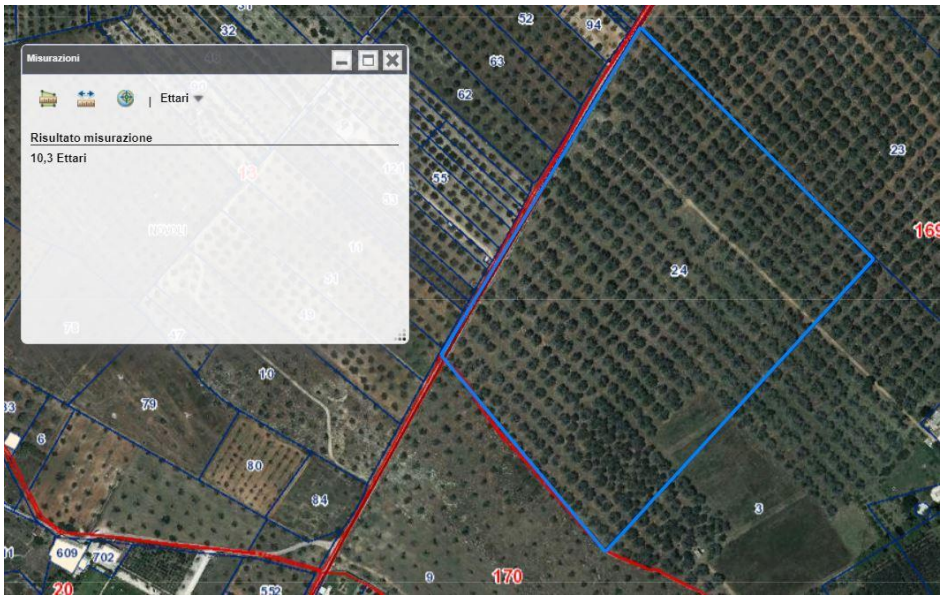


Figura 4.3: Ortofoto 2019. Fonte: *PPTR Regione Puglia – Riprese AGEA*

L'oliveto ha un'estensione di circa 10.3 ha ed è uno tra i pochissimi campi leccesi ad essere costituito quasi esclusivamente dalla varietà "Ogliarola Salentina". Sono alberi secolari, con un'età di circa 120-130 anni. L'ultima raccolta si è avuta nel 2016; ad oggi (novembre 2021) gli alberi sono quasi

completamente secchi (Figura 4.4), è rintracciabile solo qualche ramoscello verde e, in un'alcuni alberi, la presenza di polloni spondali, alla base del tronco (Figura 4.5).

Figura 4.4: Stato degli alberi d'olivo nell'area di interesse (Lecce)

Figura 4.5: Dettaglio dei polloni spondali presenti alla base degli olivi colpiti da Xylella (Lecce)

Area 2: Lequile (Lecce)

La 2° area di interesse si trova nel comune di Lequile, in provincia di Lecce (Foglio 28, particella 164).

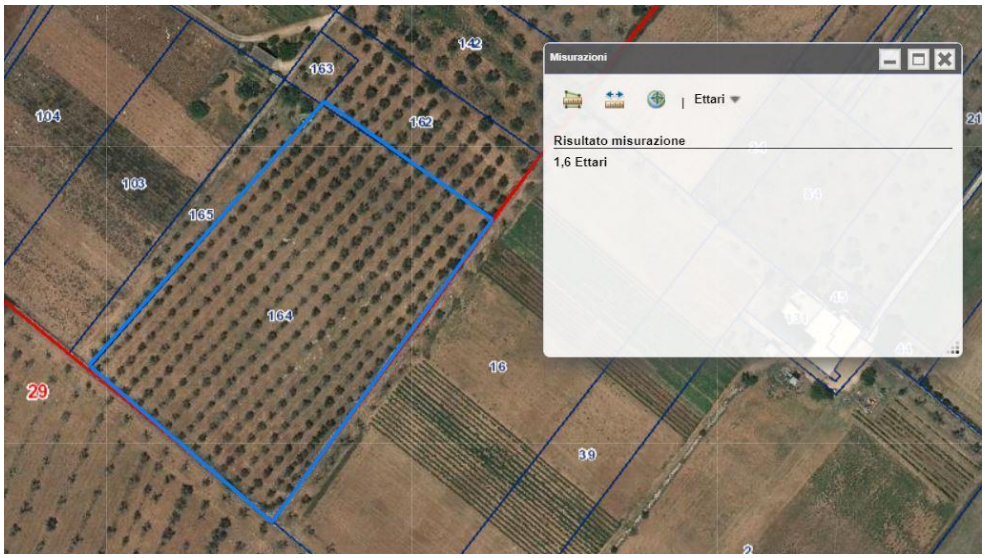


Figura 4.6: Ortofoto 2019. Fonte: *PPTR Regione Puglia– Riprese AGEA*

L'oliveto ha un'estensione di circa 1.6 ha ed ospita sia la varietà di "Ogliarola Salentina" che di "Cellina di Nardò". Sono alberi relativamente giovani, con un'età compresa tra i 25 e i 30 anni. L'ultima raccolta di olive si è avuta nel 2015. Ad oggi (novembre 2021) gli alberi risultano quasi completamente secchi (Figura 4.7).

Figura 4.7: Stato degli alberi di olivo nell'area di interesse (Lequile)

Figura 4.8: Dettaglio albero di olivo nell'area di interesse (Lequile)

Il secondo campione di dati si basa sull'acquisizione diretta mediante sensore multispettrale montato su UAV. Per poter ricavare delle informazioni utili a partire da sensori, quale quello impiegato nello studio, è necessaria la presenza di una certa percentuale fogliare sui rami. Proprio per questo motivo,

l'attenzione si è focalizzata in zone, ed in particolare nella provincia di Brindisi, che ad oggi non risultano essere completi "cimiteri", ma che ospitano ulivi con una certa vigoria.

Sono stati confrontati 4 appezzamenti di terreno adibiti ad oliveto: tre di essi (AOI3, AOI4, AOI5) sono costituiti da olivi secolari di varietà Ogliarola (due dei quali (AOI3, AOI5) facenti parte della cosiddetta "Piana degli Ulivi Monumentali"), mentre il quarto (AOI6) ospita piante relativamente più giovani (circa 25-30 anni) di varietà "Cellina di Nardò".

Lo stato attuale (ottobre 2021) dei 4 oliveti è differente ed è qui sintetizzato; a seguire verrà dettagliato sulla base di documentazione fotografica e di analisi vegetazionali:

1. AOI3: gli olivi non presentano alcun sintomo. Nessuna raccolta degli ultimi anni ha subito variazioni negative dovute all'epidemia.
2. AOI4: un unico olivo presenta una piccola parte della chioma compromessa. I restanti non presentano alcuna sintomatologia. Dai risultati delle analisi di monitoraggio eseguite dal Distretto fitosanitario, pubblicati in data 4 novembre 2021 sul sito Emergenza Xylella, gli alberi sono risultati positivi al batterio.
3. AOI5: alcuni olivi presentano rami insecchiti, tuttavia la percentuale presente sugli alberi, ai fini delle analisi delle immagini acquisite con UAV, è irrisoria, in quanto è stata potata più volte nel corso degli ultimi 2 anni.
4. AOI6: tutti gli olivi si presentano in uno stato di malattia avanzato. La maggior parte della chioma è compromessa.

Il primo rilievo è stato eseguito in data 25 ottobre 2021, sull'AOI3, AOI4 e AOI5, mentre il secondo è stato svolto sull'AOI6 in data 03 novembre 2021.

Area 3: Fasano – Località Torre Spaccata (Brindisi)

La prima area oggetto di studio è sita nel comune di Fasano (BR), in località Torre Spaccata, (Foglio 3, particelle 35-66). Rientra all'interno della zona di contenimento. L'acquisizione è stata eseguita su una porzione di oliveto avente dimensioni pari circa a 0.75 ha.

Si tratta di un oliveto di Ogliarola, costituito da alberi secolari e monumentali, che si trovano nella rinomata Piana degli Ulivi Monumentali; sono dotati di numero identificato e censiti all'interno del Sistema Informativo Territoriale (S.I.T.) della Regione Puglia, a seguito di DGR 1358/2012 (Figura 4.9).

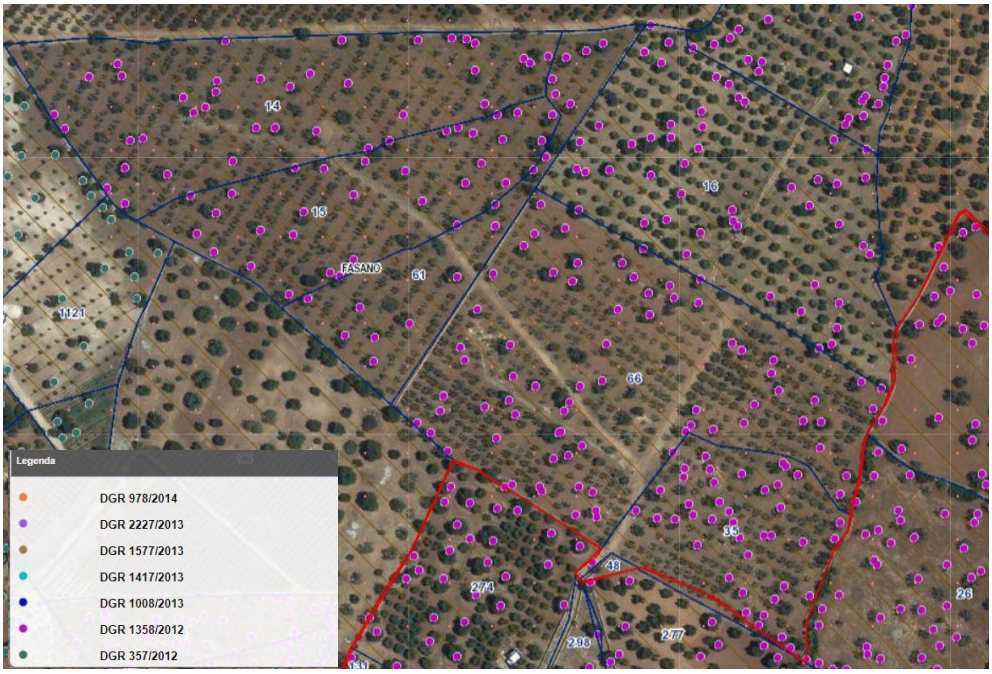


Figura 4.9: Dettaglio della Piana degli Ulivi Monumentali rispetto all'area di studio di Fasano. Fonte: *SIT, Regione Puglia*

L'area è stata oggetto della campagna del 2020 condotta dell'Osservatorio Fitosanitario avente come fine il monitoraggio dell'epidemia all'interno della Regione. Tutti i campioni analizzati in laboratori sono risultati negativi (Figura 4.10).

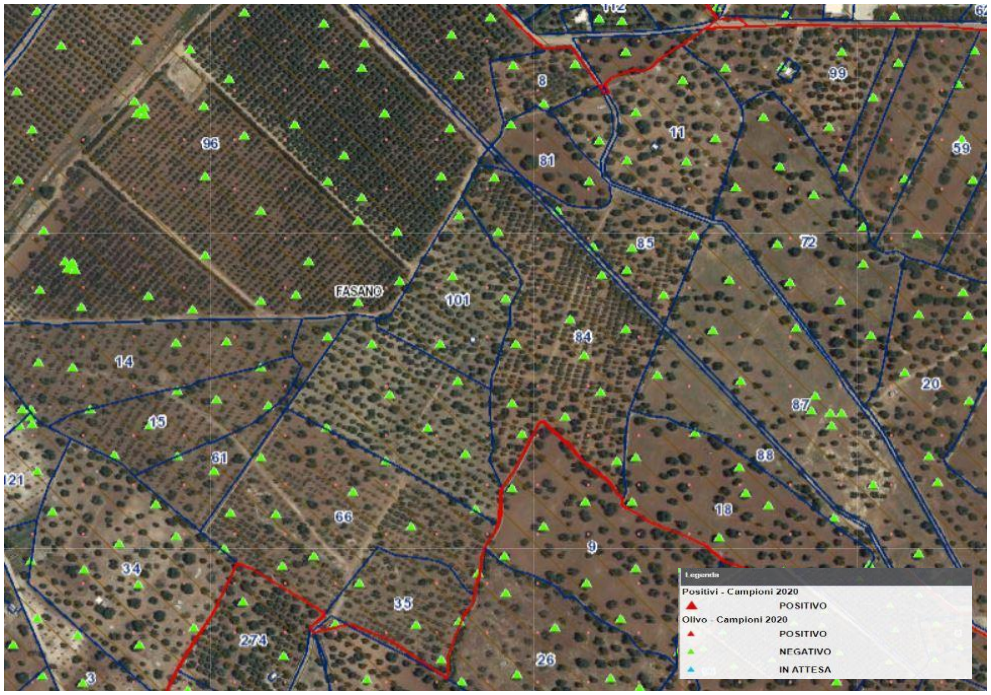


Figura 4.10: Dati del monitoraggio 2020 (Fasano) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

Al momento del rilievo, le piante godono di un ottimo stato di salute (Figura 4.11) come testimonia l'abbondante raccolta della stagione appena conclusasi, che non ha subito alcuna inflessione in termini di produzione rispetto alla stagione 2020.

Figura 4.11: Stato degli alberi nell'area di interesse (Fasano, AOI1)

Area 4: Fasano – Località Torre Canne (Brindisi)

La quarta area di interesse rientra anch'essa nel comune di Fasano (BR), in località Torre Canne. Si tratta di un piccolo appezzamento di terreno (Foglio 127, particella 269), di circa 0.3 ha, con alberi di Ogliarola facenti parte dell'area di contenimento.

A seguito del monitoraggio 2020 (Figura 4.12), che ha evidenziato la presenza di un focolare proprio in questo oliveto, è stato ordinato l'espianto dei 4 alberi infetti.

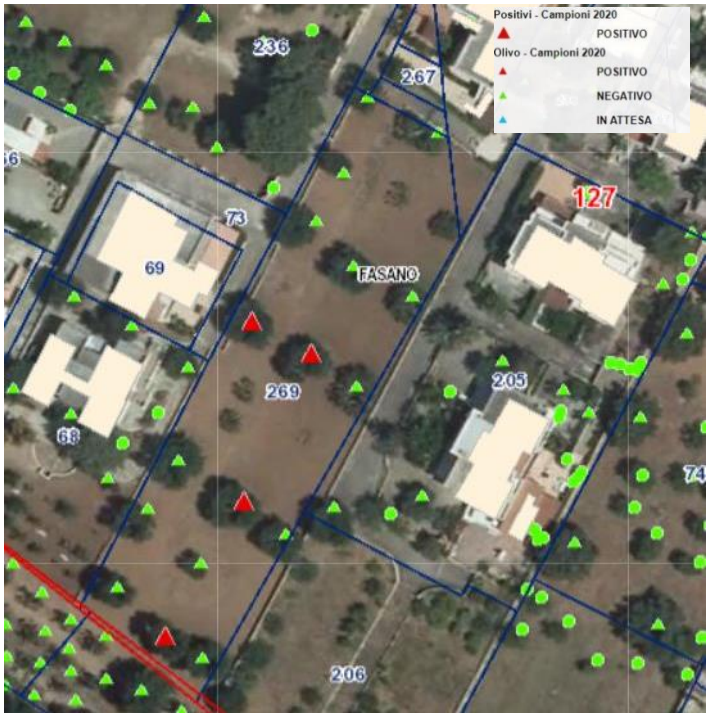


Figura 4.12: Dati del monitoraggio 2020 (Fasano) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

La stessa area è stata oggetto di monitoraggio anche nell'anno 2021. In Figura 4.13 sono stati segnati in bianco gli alberi espiantati a seguito di ordinanza dell'anno 2020 e non più presenti nell'area. L'ortofoto presente sul S.I.T. è aggiornata al 2019.

Figura 4.13: Dati del monitoraggio 2021 (Fasano) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

Gli olivi segnati in bianco sono quelli espiantati a seguito di ordinanza dell'anno 2020 e non più presenti nell'area. L'olivo segnato in roso è quello sul quale è rintracciabile un ramo secco.

Al momento del rilievo gli alberi godono di uno stato di salute ottimale, gli unici sintomi molto lievi che farebbero pensare ad un'incipiente malattia sono ritracciabile su un olivo (Figura 4.14), che è segnato in rosa nella Figura 4.13.

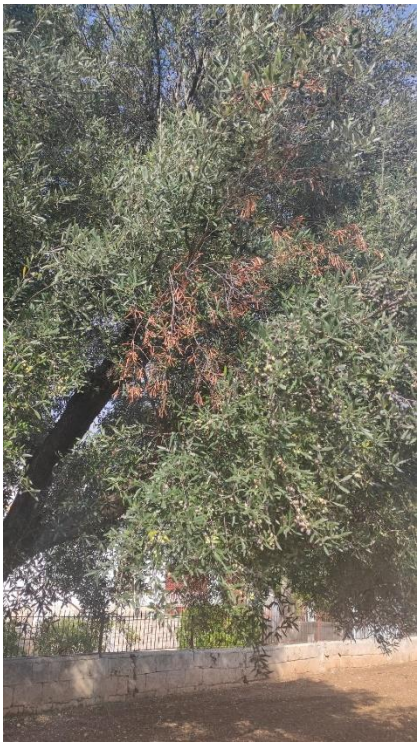


Figura 4.14: Dettaglio ramoscello area di interesse (Fasano, AOI2)

Area 5: Ostuni (Brindisi)

La quinta area di interesse fa parte del comune di Ostuni (Foglio 60, Particella 324), in provincia di Brindisi, in particolare sulla S.P. 20 Ostuni-Villanova. L'area rientra nell'attuale zona infetta (un tempo di "contenimento"). L'area oggetto di rilievo è di circa 1.4 ha.

Gli olivi appartengono alla varietà Ogliarola e sono secolari; si trovano anch'essi nella Piana degli Ulivi Monumentali e sono censiti all'interno del S.I.T. della Regione Puglia, a seguito di DGR 357/2012 (Figura 4.15).

Figura 4.15: Dettaglio della Piana degli Ulivi Monumentali rispetto all'area di studio di Ostuni. Fonte: *SIT, Regione Puglia*

Figura 4.16: Alberi di olivo monumentali censiti presenti nell'area di studio (Ostuni, Brindisi)

Nell'area di interesse il monitoraggio condotto è stato per lo più di tipo "visivo" nel 2019; l'unico ed ultimo campionamento effettuato risale alla campagna 2018-2019 ed ha prodotto un risultato negativo alla Xylella (Figura 4.17).

Figura 4.17: Dati del monitoraggio 2018-2019 (Ostuni, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

A questo proposito, si ritiene opportuno segnalare un focolaio presente nelle immediate vicinanze (2 km ca) che ha prodotto risultati positivi ai test di laboratorio sia nella campagna 2020 (Figura 4.18) che in quella del 2021 (Figura 4.19).

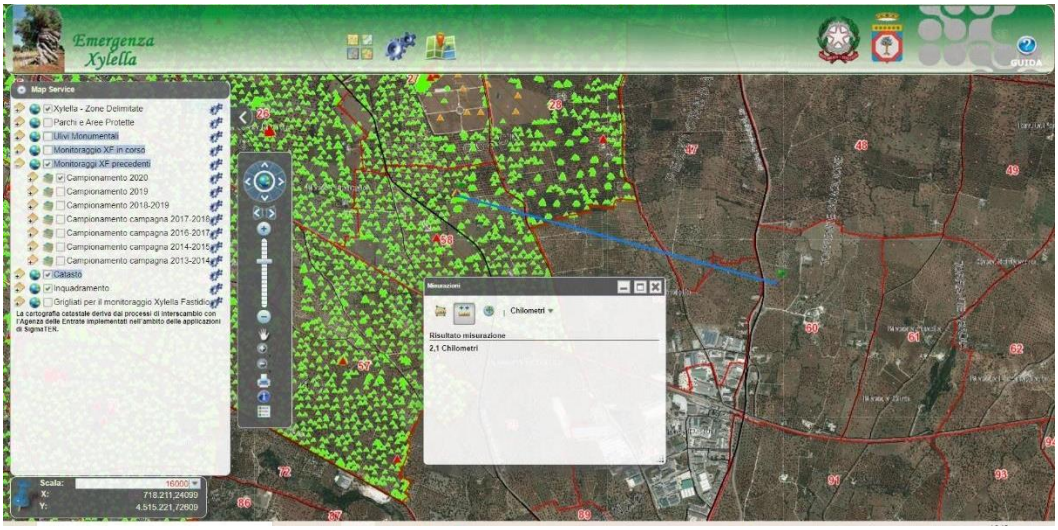


Figura 4.18: Dati del monitoraggio 2020 (Ostuni, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

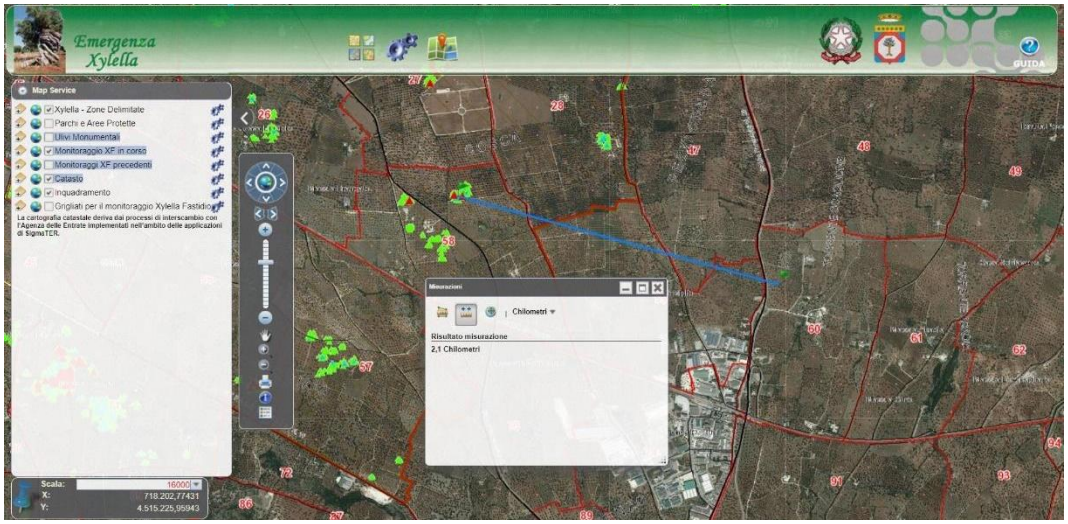


Figura 4.19: Dati del monitoraggio 2021 (Ostuni, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

Gli ulivi oggetto di indagine al momento del rilievo godevano di discreto stato di salute ed una quantità di olive paragonabile, in termini quantitativi, a quella dell'anno 2020. (Figura 4.20).

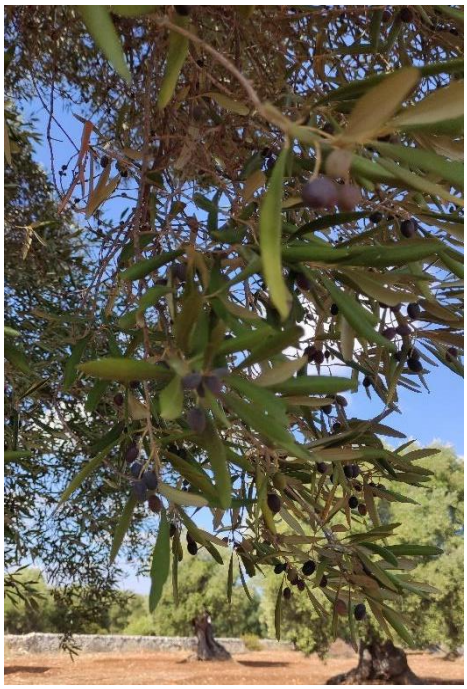
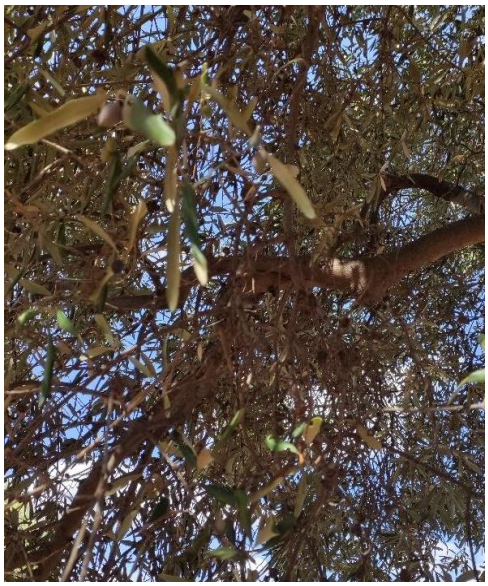


Figura 4.20: Stato degli alberi d'olivo presenti nell'area (sx) e dettaglio del ramo (dx) (Ostuni, Brindisi)

Il disseccamento, comunque presente, non è quasi direttamente visibile sugli alberi, in quanto quasi tutti i rami secchi sono stati oggetto di rimonda (Figura 4.21) da parte degli agricoltori, i quali, in buona fede, continuano a sperare di poter risolvere così il problema.



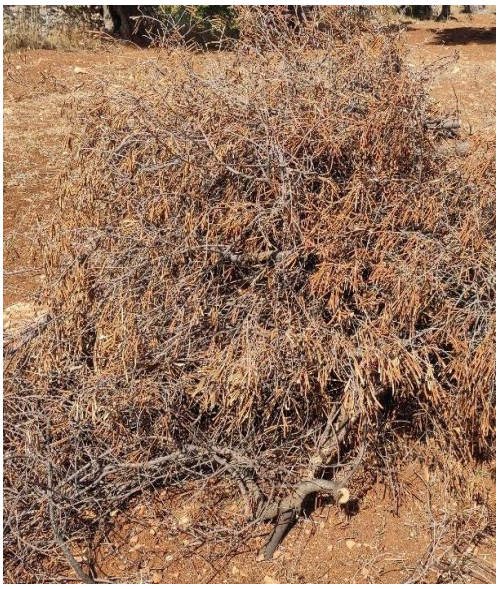


Figura 4.21: Rami insecchiti non potati (sx) e potati (dx), presumibilmente imputabili alla Xylella (Ostuni, Brindisi)

Area 6: San Pietro Vernotico (Brindisi)

L' ultima, area oggetto di rilievo rientra all'interno dell'area classificata come "infetta" e si trova anch'essa nel brindisino, nel comune di San Pietro Vernotico (Foglio 13, particelle 6, 191, 521), al confine con la provincia di Lecce, sulla S.P.86 San Pietro Vernotico-Campo di Mare. La dimensione dell'appezzamento considerato è di circa 0.35 ha.

Nell'area di interesse non sono stati eseguiti campionamenti, le ultime ed uniche analisi condotte nelle zone circostanti risalgono alla campagna 2014-2015, che peraltro ha dato tutti risultati negativi (Figura 4.22).

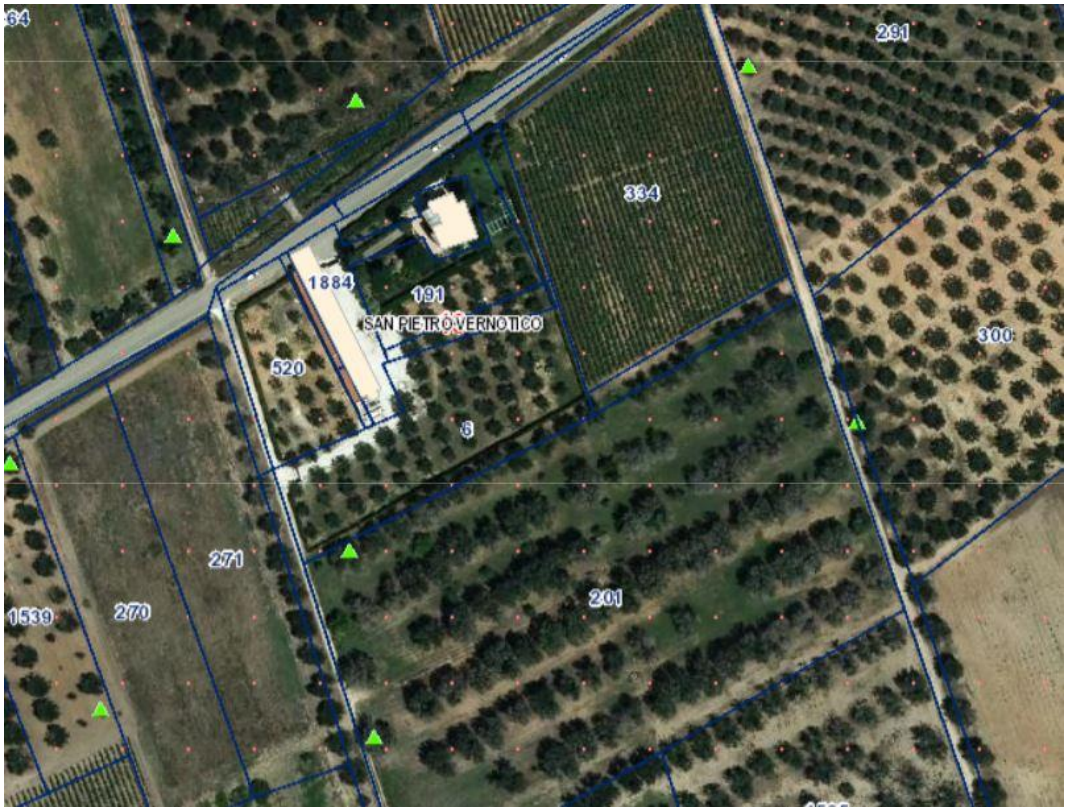


Figura 4.22: Dati del monitoraggio 2014 (San Pietro Vernotico, Brindisi) Fonte: *SIT, Regione Puglia*

Tutte le campagne di monitoraggio successive sono state condotte nelle zone di contenimento e cuscinetto, essendo il fine ultimo quello di valutare l'espansione dell'epidemia. Pertanto non si può dire con assoluta certezza scientifica che tali olivi siano affetti da Xylella fastidiosa, tuttavia, data la posizione geografica e il periodo storico in cui questi hanno iniziato a manifestare i primi sintomi, possiamo perlomeno parlare di alta, se non altissima, probabilità di infezione causata dal batterio killer.

Gli alberi rilevati sono olivi della varietà Cellina di Nardò, relativamente giovani, essendo stati piantati circa 25-30 anni (Figura 4.23). I tronchi infatti hanno diametri sensibilmente minori se confrontati con quelli secolari di varietà Ogliarola, presenti nell'area di Ostuni.

Figura 4.23: Stato degli alberi di olivo presenti nell'area (San Pietro Vernotico, Brindisi)

Il campo rappresenta quasi un *unicum* nel territorio circostante, una piccola "oasi verde", se così può essere definita, che si erge tra il cimitero di oliveti che fanno da cornice alla S.S.613 che da Lecce porta verso Brindisi.

4.2 Strumenti impiegati nella fase di acquisizione

Nella fase di acquisizione sono stati impiegati 2 strumenti e, in particolare, 2 UAV, ciascuno dotato di sistemi differenti.

DJI Mavic 2 Pro (Figura 4.24), è stato impiegato per fornire la documentazione fotografica a supporto dei risultati ottenuti dalle immagini aeree.

Figura 4.24: DJI Mavic 2 Pro

Il sistema è dotato di un'unica fotocamera che acquisisce, mediante scatto singolo, nel visibile e restituisce delle immagini in colori reali ("ortofoto"), in formato JPEG/DNG. Il FOV (Field of View) è di circa 77°. Si riportano in Tabella 4.2 le specifiche tecniche del velivolo.

Peso al decollo	Mavic 2 Pro: 907 g Mavic 2 Zoom: 905g
Dimensioni	Chiuso: 214×91×84 mm Aperto: 322×242×84 mm
Diagonale	354 mm
Velocità ascensionale (max.)	5 m/s (modalità S) 4 m/s (modalità P)
Velocità di discesa (max.)	3 m/s (modalità S) 3 m/s (modalità P)
Velocità massima (al livello del mare, in assenza di vento)	72 km/h (modalità S)
Quota massima di tangenza operativa sul livello del mare	6000 m
Autonomia di volo (in assenza di vento)	31 minuti (a 25 km/h costanti)
Autonomia di volo stazionario (in assenza di vento)	29 minuti
Distanza di volo (in assenza di vento)	18 km (a 50 km/h costanti)
Resistenza alla velocità del vento (max.)	29-38 km/h
Angolo massimo di inclinazione	35° (modalità S, con radiocomando), 25° (modalità P)
Velocità angolare (max.)	200°/s
Temperatura operativa	-10°C – 40°C

Tabella 4.2: Caratteristiche tecniche DJI Mavic 2 Pro. Fonte: *https://www.dji.com/it/mavic-2/info*

Per quanto riguarda il secondo strumento, è stato impiegato ai fini dell'acquisizione del secondo campione di dati. Si tratta del sistema ad alta precisione DJI Phantom 4 Multispectral (Figura 4.25) dotato di un sistema integrato per l'acquisizione di immagini multispettrali, adoperato prettamente in campo agricolo.

Figura 4.25: Phantom 4 Multispectral impiegato nella fase di rilievo (sx) e dettaglio delle fotocamere (dx)

In Tabella 4.3 sono riportate le specifiche tecniche dell'aeromobile.

Peso al decollo	1487 g
Distanza diagonale (senza eliche)	350 mm
Quota massima di tangenza sopra il livello del mare	6000 m (19.685 ft)
Massima velocità ascensionale	6 m/s (volo automatico); 5 m/s (controllo manuale)
Massima velocità di discesa	3 m/s
Velocità massima	50 km/h (modalità P); 58 km/h (modalità A)
Autonomia di volo	Circa 27 minuti
Temperatura operativa	0 – 40 °C
Frequenza operativa	2.4000 GHz – 2.4835 GHz (Europa, Giappone, Corea)5.725 GHz – 5.850 GHz (altri Paesi/località)[1]
Potenza di trasmissione (EIRP)	2.4 GHz: < 20 dBm (CE / MIC / KCC)5.8 GHz: < 26 dBm (FCC / SRRC / NCC)
Accuratezza del volo stazionario	RTK attivato e correttamente funzionante: Verticale: ±0,1 m; orizzontale: ±0,1 m RTK disattivato: Verticale: ±0,1 m (con posizionamento visivo); ±0,5 m (con posizionamento GNSS) Orizzontale: ±0,3 m (con posizionamento visivo); ±1,5 m (con posizionamento GNSS)
Compensazione della posizione dell'immagine	Le posizioni relative al centro di ogni sensore CMOS sulle sei fotocamere, e al centro di fase dell'antenna D-RTK integrata, vengono calibrate e riportate sui dati EXIF di ciascuna immagine.

Tabella 4.3: Caratteristiche tecniche Phantom 4 Multispectral. Fonte: *https://www.dji.com/it/p4-multispectral*

Il sistema è dotato di 6 fotocamere, 5 a bande strette e una camera RGB, ciascuna avente una risoluzione effettiva pari a 2.08 Mpx con otturatore globale e stabilizzatore su 3 assi. Il FOV (Field Of View) è pari a 62.7°, mentre la lunghezza focale è di 5.74 mm. La fotocamera che acquisisce immagini RGB su luce visibile le restituisce in formato JPEG, mentre gli altri 5 sensori monocromatici consentono di acquisire immagini multispettrali, restituendole in formato TIFF. In Tabella 4.4 si riportano le specifiche delle bande di acquisizione.

	Λ (nm)	Larghezza banda (nm)
Blu	450	32
Verde	560	32
Rosso	670	32
Red Edge	730	32
NIR (Vicino Infrarosso)	840	52

Tabella 4.4: Bande di acquisizione del sistema multispettrale integrato nel Phantom 4 Multispectral

Lo strumento è dotato di un sensore di luminosità integrato, posizionato nella parte superiore della scocca, che ne cattura l'irradiazione al fine di garantire l'accuratezza e l'omogeneità dei dati acquisiti. Le immagini acquisite vengono automaticamente georeferenziate mediante il sistema TimeSync di DJI per misurazioni precise a livello centimetrico. L'accuratezza di posizionamento verticale è pari a 1.5 cm+1 ppm, mentre quella orizzontale è pari a 1 cm+1 ppm. (1 ppm indica un errore con l'aumento di 1 mm su 1 km di movimento).

4.3 Caratteristiche dei datasets

Primo campione di dati

Per quanto riguarda il primo campione di dati, ossia le immagini aeree, per ciascun frammento che compone l'ortomosaico dell'area sono state fornite due immagini identiche (RGB e CIR)

Le cosiddette immagini RGB si basano sulla combinazione delle 3 bande del visibile (Red-Green-Blue), pertanto, ciò che si vede nell'immagine appare esattamente come lo vedremmo ad occhio nudo, si parla infatti di "True Color Image". Le immagini CIR (Color-Infrared), invece, si basano sulla combinazione della banda dell'infrarosso vicino (Near Infrared), del rosso e del verde. In questo caso, l'immagine che viene visualizzata a schermo è detta "False Colour Image", infatti i colori non corrispondono a quelli reali, ma ad esempio tutto ciò che è vegetato appare di colore rosso più o meno inteso a seconda del livello di vigoria.

Come già precedentemente detto, la vegetazione riflette maggiormente in corrispondenza della banda del NIR, che corrisponde all'intervallo di lunghezza d'onda (λ) pari circa a 800-2500 nm, per questo motivo risulta più utile, quando si parla di agricoltura, utilizzare nei rilievi dei sensori ad infrarosso che aiutino a distinguere con un certo livello di sicurezza ed immediatezza cosa è "sano" da cosa non lo è.

In Tabella 4.5 si riportano le caratteristiche delle immagini aeree fornite dalla CGR.

	2015	2016	2019
Data di acquisizione	30/05, 2/06	7/05, 25/05, 26/05, 18/06	24/07
Risoluzione geometrica	30 cm	20 cm	20 cm
Numero di bande	4	4	4

Tabella 4.5: Caratteristiche tecniche immagini aeree

Dopo aver effettuato delle prime analisi comparative si è deciso di escludere le acquisizioni risalenti al 2015 e basare dunque l'analisi sul confronto tra le acquisizioni del 2016 e del 2019. Questa scelta è stata fatta principalmente per 2 motivi:

1. I valori di IV ottenuti per il 2015 erano molto simili, se non in alcuni casi identici, a quelli ottenuti per il 2016 per entrambe le aree, verosimilmente in conseguenza del fatto che le due acquisizioni sono state fatte nei medesimi periodi (fine maggio e inizio giugno);
2. Le immagini acquisite nel 2015 hanno una precisione di 30 cm, mentre quelle scattate nel 2016 e nel 2019 hanno la stessa precisione geometrica pari a 20 cm; pertanto il confronto risulta essere più robusto ed immediato.

<u>Secondo campione di dati</u>

Per quanto riguarda il secondo campione di dati, come già detto nel precedente paragrafo, è stato acquisito impiegando 5 bande differenti, le canoniche 3 del visibile (red-green-blue) e le prime due dell'infrarosso, ossia il "bordo rosso" (red edge), che segna il confine tra ciò che è visibile ad occhio nudo e ciò che non lo è, e il NIR.

Si riportano in Tabella 4.6 le specifiche di acquisizione.

	AOI 3	AOI 4	AOI 5	AOI 6
Data di acquisizione	25/10/2021	25/10/2021	25/10/2021	03/11/2021
Ora di acquisizione	11.30	12.00	10.15	11.00
Numero di bande	5	5	5	5
Direzione di volo	Nadirale	Nadirale	Nadirale	Nadirale
Altezza di volo	70 m	70 m	70 m	70 m – 30 m

Tabella 4.6: Caratteristiche delle immagini acquisite con Phantom 4 Multispectral

In aggiunta ai singoli voli eseguiti, sono state eseguite delle foto di dettaglio ad alcuni olivi che si riteneva opportuno analizzare da vicino, ponendosi ad una quota pari a 15 m dal suolo circa. Anche in questo caso, le immagini sono state acquisite nelle 5 bande.

4.4 Metodologie impiegate nella fase di elaborazione

Primo campione di dati

Lo scopo del confronto multitemporale nelle zone aree del leccese (AOI1 e AOI2) è stato quello di individuare quale tra i vari indici di vegetazione (IV) più o meno diffusi fosse quello più idoneo per discriminare tra un olivo sano ed uno potenzialmente malato.

Per far in modo di ottenere dei risultati coerenti e comparabili tra loro, è stata eseguita la calibrazione radiometrica per le acquisizioni del 2016 e quelle del 2019 per l'AOI 1 e l'AOI 2.

Il metodo impiegato in questa sede è stato quello dell'Empirical Line. Sono stati considerati 6 punti per ciascuna area, in corrispondenza di elementi che sono rimasti immutati nel corso dei 3 anni (ad esempio capannoni, casolari, strade). A ciascuno dei 6 punti sono stati assegnati 4 valori, uno per ciascuna banda di acquisizione (Blue, Green, Red, NIR), impiegando il Tool "Add raster values to

points" implementato nel software Qgis 3.16.1. Si riportano, a titolo esemplificativo, in Tabella 4.7 i risultati ottenuti per l'AOI 1.

I valori ottenuti per ciascuna banda nei 2 anni di rifermento, espressi in DN, sono stati confrontati, mediante grafici a dispersione (Grafico 4.1). Sono stati dunque corretti i valori dell'acquisizione 2019 in funzione dell'equazione della linea di tendenza lineare associata a ciascuna banda, dove il termine x è stato, arbitrariamente, associato all'anno 2016, mentre il termine y fa riferimento all'anno 2019.

Blue Band		Green Band		Red Band		NIR Band	
2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
109	114	120	124	121	123	131	116
196	206	201	214	199	212	189	183
128	138	139	146	140	142	152	137
157	138	162	144	160	138	159	118
166	156	179	167	176	162	176	158
119	92	118	97	119	93	112	93

Tabella 4.7: Calibrazione radiometrica – AOI 1

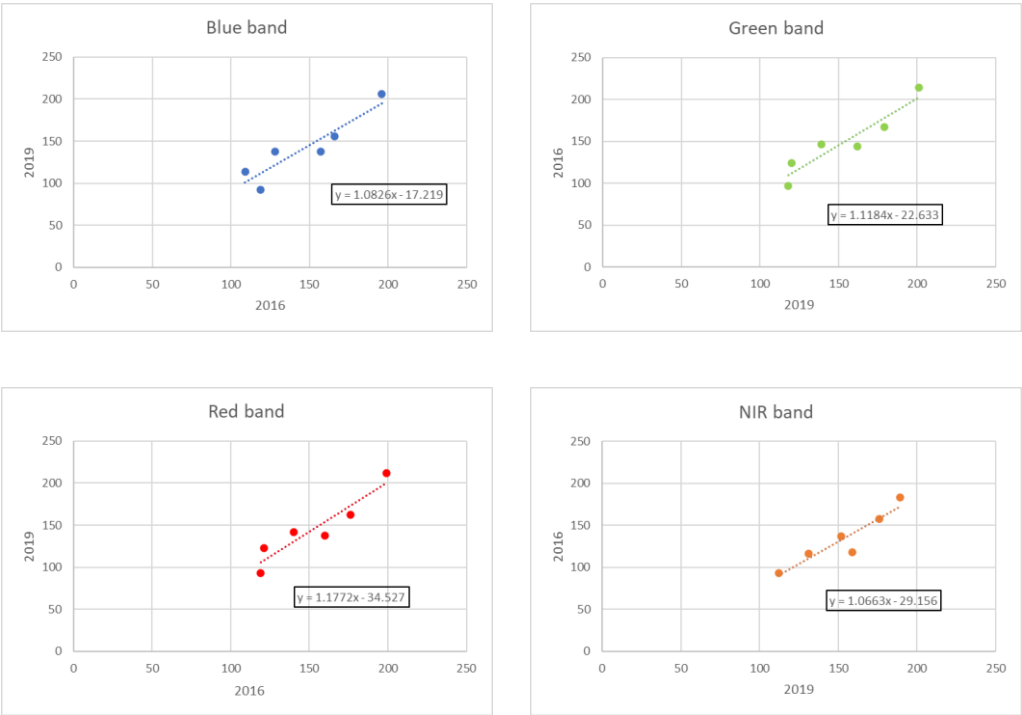


Grafico 4.1: Calibrazione radiometrica, metodo Empirical Line – AOI 1

Non avendo il modello di conversione radianza-DN, gli indici vegetazionali sono stati computati facendo riferimento ai valori dei DN. Per tale motivo, non essendo disponibile il dato relativo alla riflettanza, sono stati calcolati solo alcuni tra gli IV elencati.

In una prima analisi sono stati considerati solo quelli IV le cui espressioni algebriche sono riconducibile a delle normalizzazioni, ovvero NDVI, GNDVI, BNDVI. Ciò permette di non creare dei falsi negativi o errori nelle interpretazioni dei dati e di avere la certezza di un risultato attendibile, pur non usando direttamente il valore di riflettanza (J. M. C. Pereira, 2014).

In aggiunta a questi sono stati considerati anche altri tra gli indici sopra descritti, ovvero OSAVI, ARVI e CI, nonostante non si tratti di normalizzazioni. Questi IV sono stati selezionati in quanto hanno dato un output ottimale in termini di discretizzazione degli elementi presenti nell'acquisizione aerea (vegetazione, suolo, ombre).

Secondo campione di dati

Nelle acquisizioni eseguite con UAV, a seguito di un processo di calibrazione automatica, il valore di ciascun pixel risulta espresso in riflettanza, pertanto le analisi computazionali sono state svolte calcolando tutti gli IV elencati nel Paragrafo 3.2, ovvero NDVI, BNDVI, GVNDI, SAVI, OSAVI, MSAVI, ARVI, CI, TVI, MTVI2, MCARI1.

5. Analisi dei risultati

5.1 Risultati ottenuti dal primo campione di dati (immagini aeree)

Lo scopo dell'analisi multitemporale eseguita sul primo campione di dati è stato quello di fornire una metodologia per poter facilitare la detection degli effetti della Xylella fastidiosa e quantificarne il danno attraverso la misura della percentuale di essiccamento in funzione di alcuni indici vegetazionali.

Da un primo confronto tra le immagini CIR, che combinano la banda del NIR, quella del rosso e quella del verde, appare evidente, per entrambe le aree, il diverso stato vegetativo degli oliveti (Figura 5.1 e Figura 5.2). Il colore rosso, cui è associata la banda del NIR, rappresenta la copertura vegetata. Coerentemente con quanto ci si aspettava, il rosso risulta più brillante ed intenso nel 2016, quando ancora l'incipiente disseccamento permetteva alle foglie di assorbire una maggiore quantità di clorofilla e riflettere maggiormente la luce nell'infrarosso.

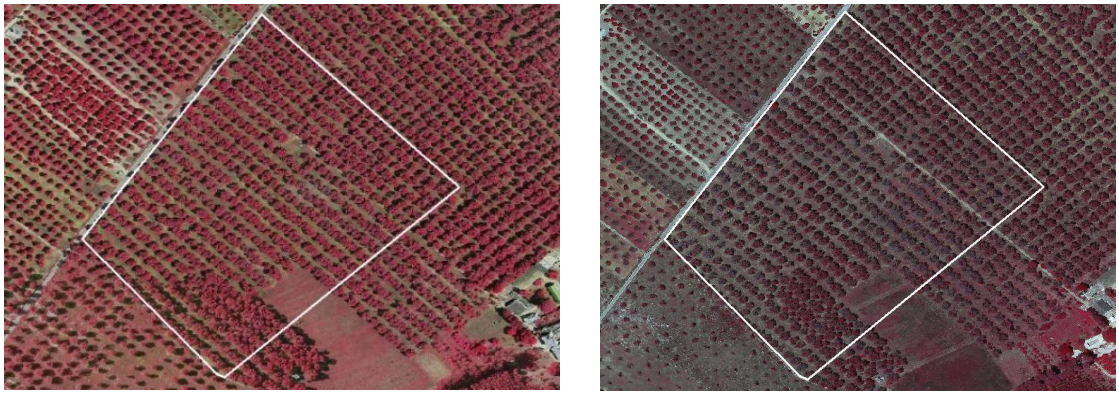


Figura 5.1: Confronto acquisizioni CIR 2016 (sx) e 2019 (dx) (Lecce, AOI1)

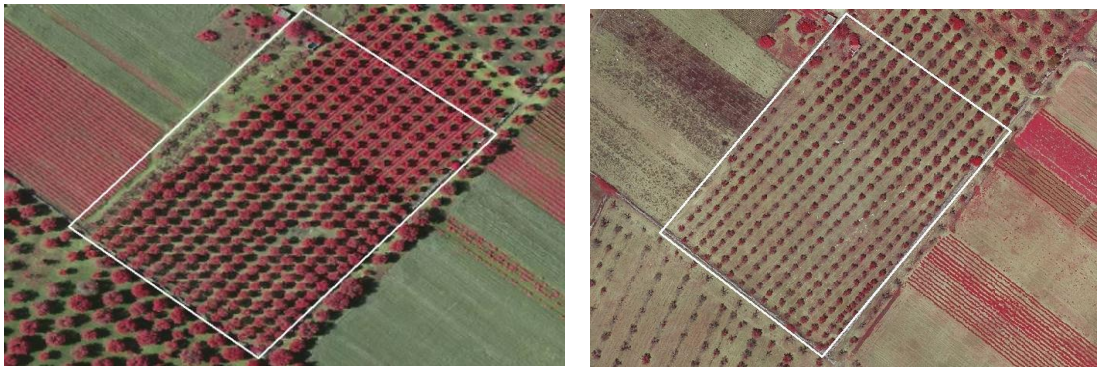


Figura 5.2: Confronto acquisizioni CIR 2016 (sx) e 2019 (dx) (Lequile, AOI2)

Il processamento delle immagini, mediante il calcolo degli IV, è stato fatto implementando le espressioni algebriche nel software ArcMap 10.4.1 mediante il tool "Raster Calculator".

Uno degli aspetti di cui maggiormente è stato tenuto conto nella scelta degli indici più idonei a discretizzare tra una pianta sana ed una potenzialmente malata è stata la capacità dell'indice di differenziare in maniera ottimale le ombre, il suolo e la chioma. L'identificazione di questi ultimi due elementi è stata quella più critica, a causa del fatto che la copertura vegetale del terreno non è totale (mediamente il sesto di impianto tradizionale è 10x10 metri), la distribuzione delle foglie non è omogenea (sono presenti dei "buchi" nella chioma) e la riflettanza dei rami secchi, preponderanti nelle immagini acquisite nel 2019, è pressoché simile a quella del terreno.

Sulla base di quanto detto, delle analisi svolte e dei precedenti studi fatti a riguardo, sono stati valutati più pertinenti per gli obiettivi del presente studio 4 IV, tra quelli precedentemente elencati (Paragrafo 3.2).

I 4 Indici Vegetazionali considerati sono: **BNDVI, GNDVI, OSAVI, ARVI.**

Il BNDVI (Blue Normalized Vegetation Index) permette di distinguere in maniera abbastanza netta ed accurata tra le ombre (in azzurro), il suolo (in giallo) e le chiome (in rosso) (Figura 5.3, Figura 5.4).

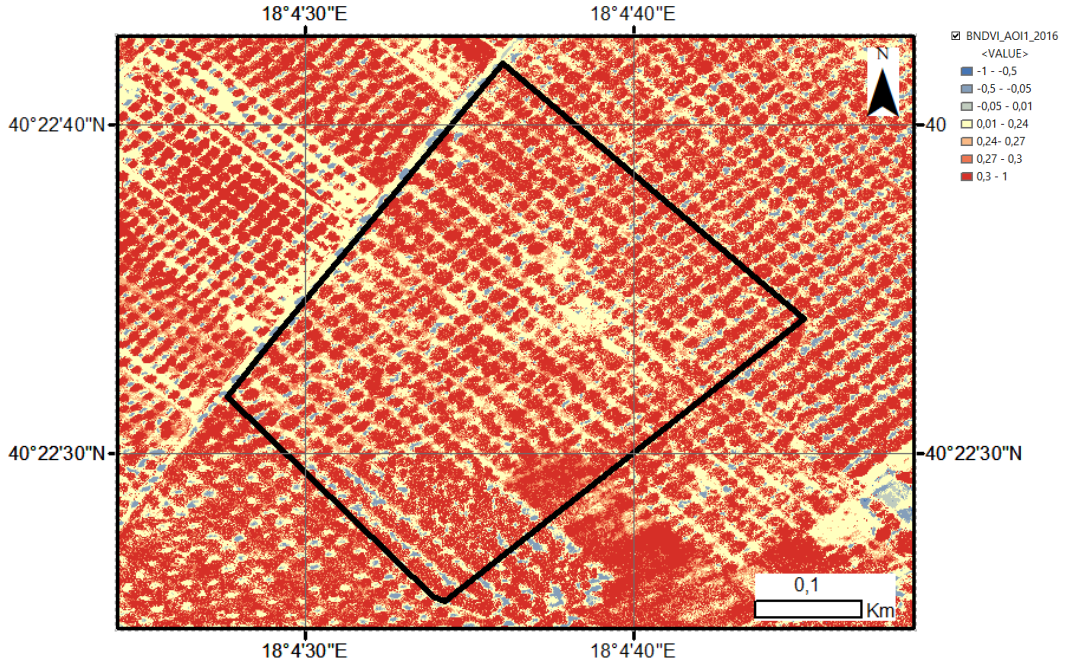


Figura 5.3: BNDVI AOI1, anno 2016 (Lecce)

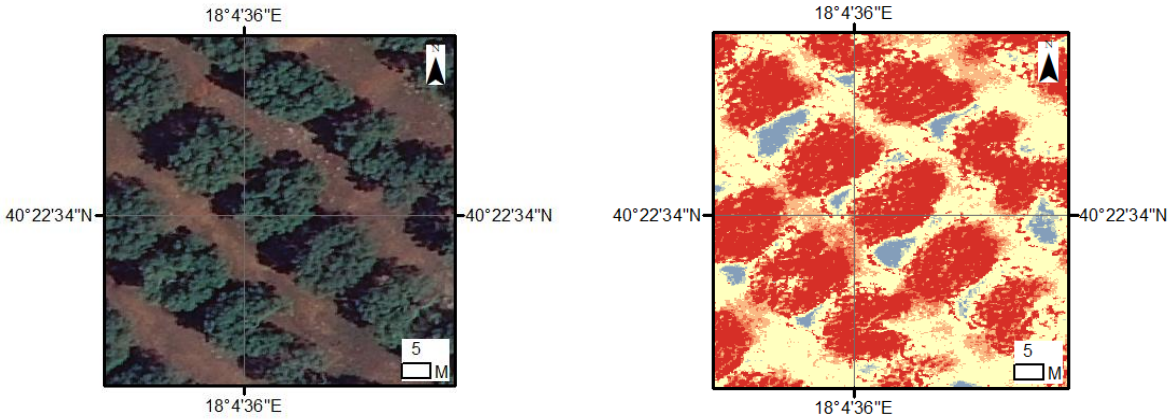


Figura 5.4: Dettaglio chioma – BNDVI AOI1, anno 2016 (Lecce)

Considerati gli elementi presenti nell'immagine aerea e la bontà del BNDVI nella discriminazione degli stessi, le immagini sono state classificate mediante un processo di Supervised Classification che ha permesso la segmentazione in 3 classi: vegetazione, ombre e suolo in base al valore BNDVI calcolato per ciascun punto. Confrontando l'output dell'indice e l'ortofoto corrispondente, è stato

ritenuto significativo, ai fini delle valutazioni, l'associazione degli elementi ai seguenti range di valori:

- Ombre: -1.00-0.15
- Suolo: 0.15-0.30
- Vegetazione: 0.30-1.00. Questo range permette di escludere quasi totalmente, la vegetazione presente sul suolo e concentrarsi sulla porzione di chioma sana.

In funzione di tale classificazione sono stati generati automaticamente dei poligoni, ciascuno associato ad una delle 3 classi sopra riportate. È stata calcolata l'area totale associata a ciascuna classe (comprensiva di n poligoni) per avere un'idea della percentuale di massa fogliare presente sulle chiome rispetto all'intero oliveto di area nota.

Le diverse aree associate a ciascuna delle 3 classi sono riportate in Tabella 5.1: alla vegetazione è associato il GRIDCODE 1, alle ombre il GRIDCODE 10, al suolo il GRICODE 19. Per quanto riguarda la vegetazione, il risultato ottenuto è coerente con la percentuale di copertura vegetale attesa per un oliveto tradizionale circa pari al 50%.

FID	Shape *	GRIDCODE	Classe	Area_mc
0	Polygon	1	Vegetazione	53868,68
1	Polygon	10	Ombre	12694,43
2	Polygon	19	Suolo	37430,03

Tabella 5.1: Area degli elementi poligonali in cui l'immagine è stata classificata: Vegetazione (1), Ombre (10), Terreno (19) – AOI1, 2016 (Lecce)

$$Copert.\ Veget.AOI1_2016 = \frac{Area\ occupata\ dagli\ olivi}{Area\ totale} = \frac{53868.68\ m^3}{103000\ m^3} * 100 \approx 52.2\%$$

Per avere coerenza tra i risultati e testare la bontà della soglia fissata per l'indice (>0.3), è stata eseguita la medesima classificazione per l'anno 2019, dove però non è risultato necessario includere la componente "ombre", del tutto assente

nell'area di interesse. A supporto della validità della tesi, si riporta di seguito un'immagine di dettaglio della chioma "sana" (associata al colore rosso) risultato della Supervised Classification (Figura 5.5) ed uno zoom della medesima chioma nell'immagine acquisita nell'infrarosso (CIR) (Figura 5.6).

Si può distinguere molto chiaramente in Figura 5.6 la porzione di chioma potenzialmente malata e quella "sana" che riflette maggiormente (indicata con gli stessi poligoni aventi campitura tratteggiata in bianco sia in Figura 5.5 che in Figura 5.7) e a cui, dunque, è associato un rosso più intenso. Per completezza si riporta anche la stessa immagine di dettaglio acquisita nel visibile (RGB): in questo caso non è così immediata la visualizzazione della parte infetta (Figura 5.8).

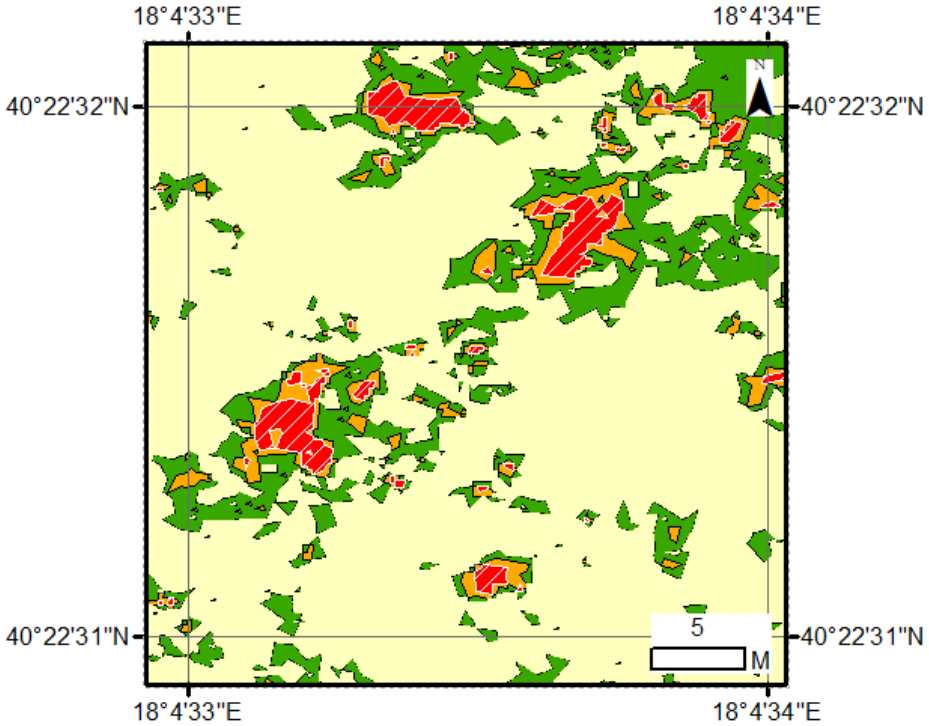


Figura 5.5: Dettaglio chioma immagine classificata – BNDVI calcolato per AOI1, anno 2019 (Lecce).

Di seguito si riporta l'associazione colore-elemento: rosso-porzione di chioma "sana", arancione-porzione di chioma "potenzialmente malata", verde-suolo con presenza di vegetazione e porzione di chioma "potenzialmente malata", giallo-suolo nudo.

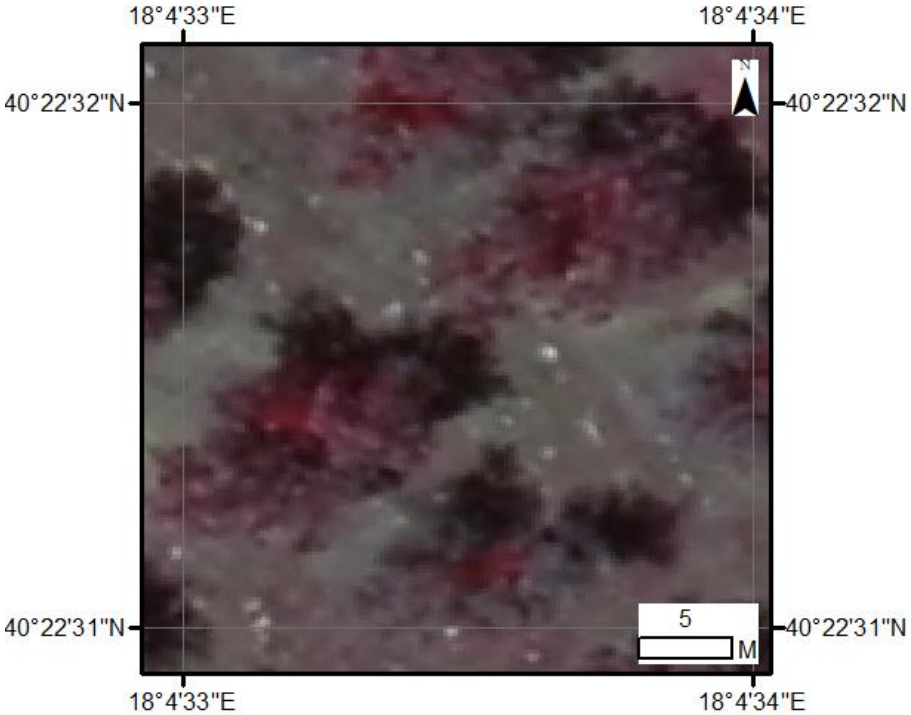


Figura 5.6: Dettaglio chioma immagine CIR – BNDVI AOI1, anno 2019 (Lecce)

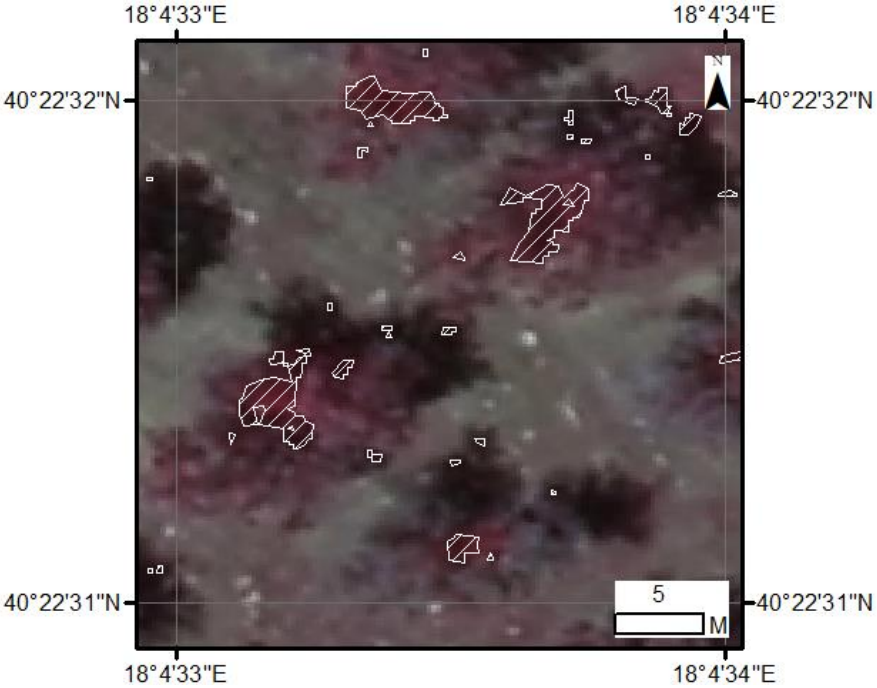


Figura 5.7: Dettaglio chioma immagine CIR con poligoni – BNDVI AOI1, anno 2019 (Lecce)

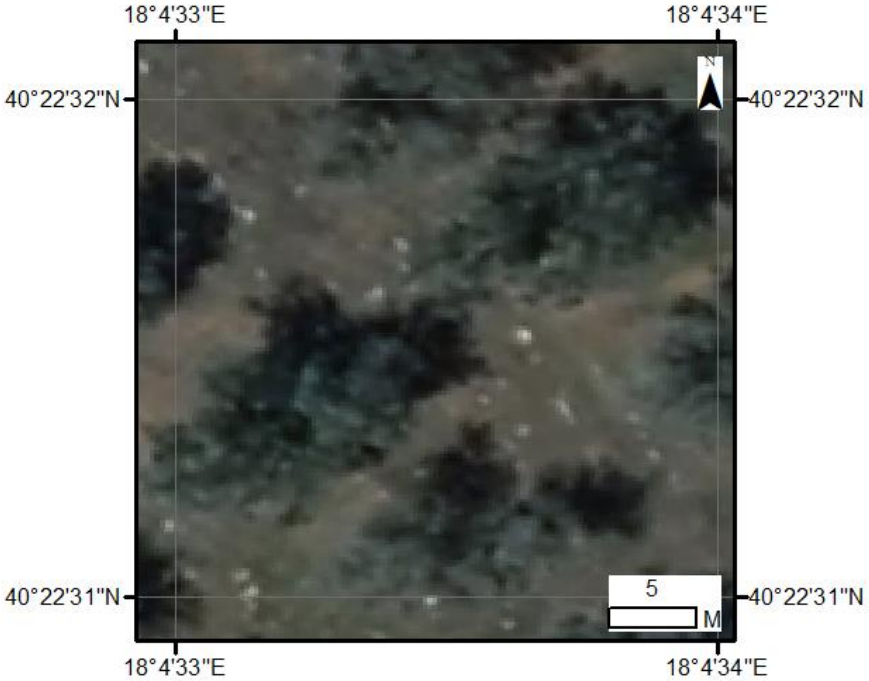


Figura 5.8: Dettaglio chioma immagine RGB – BNDVI AOI1, anno 2019 (Lecce)

In Tabella 5.2 sono riassunti i valori, in termini di superficie, relativi a ciascuno dei poligoni in cui l'immagine è stata segmentata: la porzione di chioma "sana" è associata al GRIDCODE 1, mentre la porzione di chioma con un basso contenuto di clorofilla (e, quindi, una riflettanza ed un indice minori) e il suolo (coperto di vegetazione e nudo), sono associati al GRIDCODE 19.

	FID	Shape *	GRIDCODE	Area_mc	Classe
	0	Polygon	1	8474,32	Vegetazione
▸	1	Polygon	19	95523,6	Suolo

Tabella 5.2: Area degli elementi poligonali in cui l'immagine è stata classificata: Porzione di chioma sana (1), altri elementi (19) – AOI5, 2019 (Lecce)

Per validare la classificazione fatta, è stata calcolata la percentuale di copertura vegetale. Anche in questo caso il risultato è coerente con quello che ci si aspettava: una copertura minima.

$$Copert.Veget.AOI1_2019 = \frac{Area\ occupata\ da\ olivi\ (chioma\ "sana")}{Area\ totale} = \frac{8480}{103000\ m^3} * 10 \approx 8.3\%$$

La riduzione della chioma, in termini di superficie, a causa dell'epidemia Xylella nel corso di 3 anni è stata dell'84%.

È stato fatto lo stesso ragionamento per la seconda area della provincia di Lecce (AOI2), considerando per entrambi gli anni (2016 e 2019) come "sana" la porzione di chioma avente un valore di BNDVI superiore a 0.3.

Nell'immagine acquisita nel 2019 non sono presenti ombre, pertanto la classificazione dell'immagine, ai fini della valutazione della riduzione della chioma, è stata eseguita segmentando gli elementi in 2 gruppi: Vegetazione e Terreno.

Anche in questo caso, la copertura vegetale calcolata rispetto alla porzione di chioma "sana" è coerente con i risultati attesi.

$$Copertura\ Vegetale\ AOI2_2016 = \frac{Area\ occupata\ dagli\ olivi}{Area\ totale} = \frac{7854.78\ m^3}{16000\ m^3} * 100 \approx 49\%$$

$$Copertura\ Vegetale\ AOI2_2019 = \frac{Area\ occupata\ dagli\ olivi}{Area\ totale} = \frac{2180\ m^3}{16000\ m^3} * 100 \approx 13\%$$

La riduzione della chioma, in termini di superficie, a causa dell'epidemia Xylella nel corso di 3 anni è stata del 73%.

È stato fatto il medesimo ragionamento per gli altri 3 indici vegetazionali che, in una prima fase di screening, sono ritenuti più adatti a monitorare la percentuale di essicamento che si è avuta nel corso dei 3 anni considerati.

Per l'indice GNDVI, la soglia è stata posta a 0.3, per l'indice OSAVI a 0.35, mentre per l'ARVI a 0.20. A seguire, si riportano in Tabella 5.3 e nel Grafico 5.1 i risultati ottenuti per ciascun anno per le due aree considerate (AOI1-AOI2).

	Range considerato	Area chioma 2016 (m^2)	Area chioma 2016 (%)	Area chioma 2019 (m^2)	Area chioma 2019 (%)	Riduzione 2016-2019 (%)	
BNDVI	0.3-1	53 870	52.2%	8 475	8.3%	**84.0%**	AOI1 LECCE
		7 855	49.0%	2 180	13.0%	**73.0%**	AOI2 LEQUILE
GNDVI	0.3-1	61 100	59.0%	8 300	8.2%	**86.0%**	
		9 300	58.0%	2 000	12.0%	**78.5%**	
OSAVI	0.35-1	54 500	53.0%	10 900	10.5%	**80.0%**	
		7 500	47.0%	1 600	10.0%	**78.0%**	
ARVI	0.2-1	61 300	59.5%	10 400	10.0%	**83.0%**	
		9 650	60.0%	2 100	13.0%	**78.0%**	

Tabella 5.3: Sintesi dei risultati ottenuti da immagini aeree

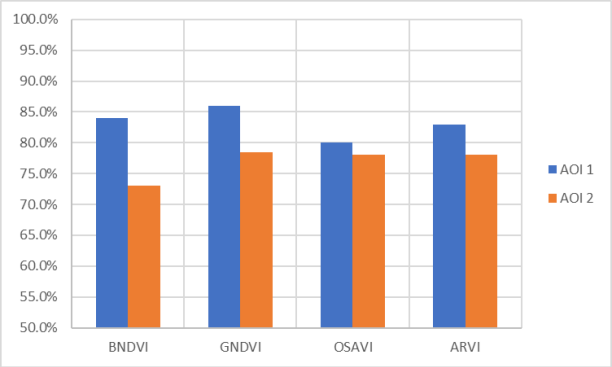


Grafico 5.1: Confronto tra gli IV

Per tutti e 4 gli altri, si sono ottenuti dei valori di riduzione di chioma simili e coerenti tra loro:

- Per l'AOI1, Lecce, i valori in termini di percentuale oscillano tra l'80% (OSAVI) e l'86% (GNDVI);
- Per l'AOI2, Lequile, i valori in termini di percentuale oscillano tra il 73% (BNDVI) e il 78.5% (GNDVI).

L'ultima raccolta di olive per l'AOI1 è stata fatta nel 2016, mentre per l'AOI2 è avvenuta nel 2015; ciò implica che la malattia nel 2016 aveva già danneggiato in maniera irreparabile l'oliveto dell'area di Lequile (AOI2), il che spiegherebbe il motivo per cui in questa area si registrano valori leggermente inferiori in termini di percentuale di essiccamento in riferimento al periodo 2016-2019. Inoltre, le immagini acquisite in campo (di seguito riportate) rivelano la presenza di una massa fogliare maggiore per quanto riguarda l'AOI2 (infatti gli IV

attestano una massa fogliare maggiore, in termini di percentuale, nel 2019, per l'AOI2 rispetto all'AOI1).

Si ritiene opportuno inoltre precisare che il motivo per cui le percentuali calcolate per l'AOI1 sono leggermente inferiori a quelle dell'AOI2 (sito nel quale sono presenti varietà Ogliarola e Cellina nella stessa quota parte) è dovuto alla presenza quasi esclusiva nell'AOI1 di olivi di varietà Ogliarola, maggiormente colpita rispetto alla varietà Cellina.

I valori ottenuti, in termini di massa fogliare, la quale risulta comunque minima in entrambi i casi per l'anno 2019, risultano essere confermati dalla documentazione fotografica precedentemente riportata (Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.6, Figura 4.7) e dalle seguenti immagini acquisite con UAV (AOI1) e con rilievo fotografico da terra (AOI2).

Nell'area situata nel comune di Lequile (AOI2) non è stato possibile eseguire il rilievo aereo poiché l'area risulta essere una "no-fly zone" a causa della vicinanza con l'aeroporto militare di Galatina (Figura 5.9).

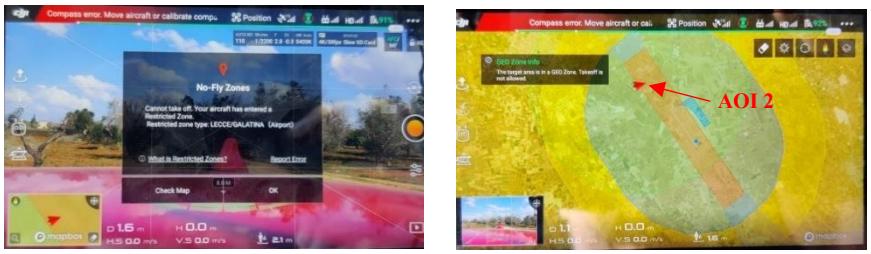
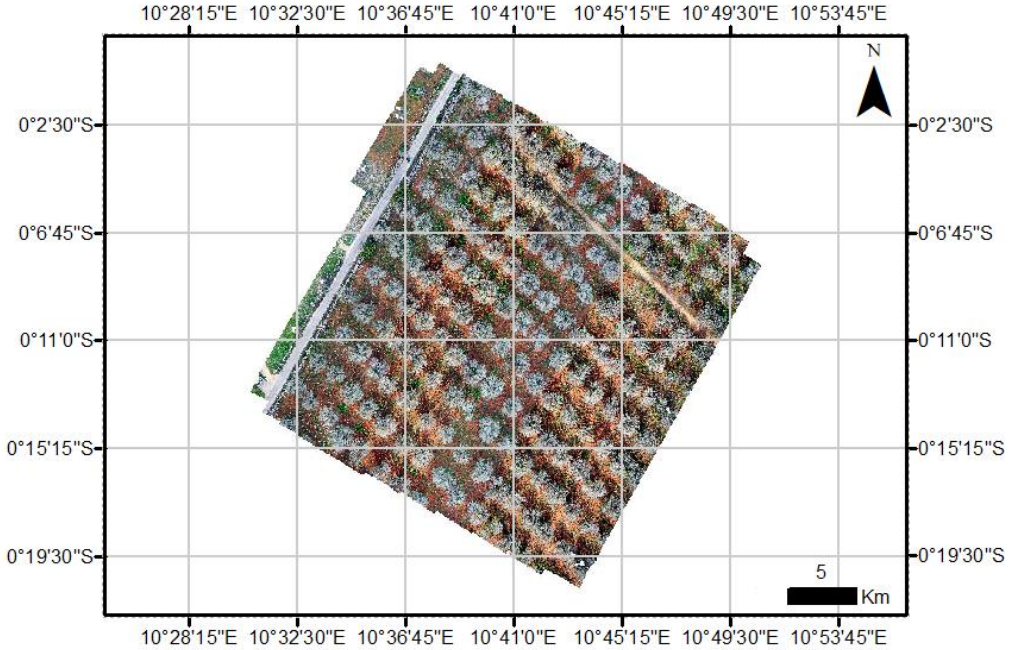


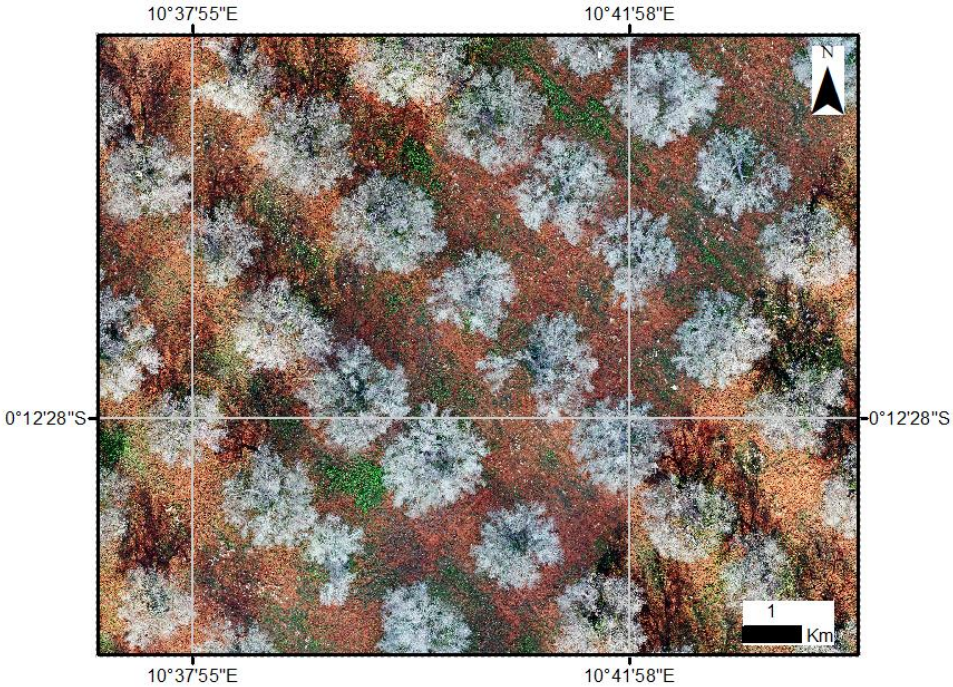
Figura 5.9: No-Fly Zone, AOI2 (Lequile)

I risultati ottenuti, relativi al 2019, hanno trovato conferma con le immagini acquisite in campo nell'ottobre 2021, per via del fatto che non è stato seguito alcun tipo di trattamento (né precedente né successivo al momento delle acquisizioni aeree fornite dalla CGR), pertanto la situazione, in termini di alberi essiccati, è rimasta pressoché invariata (come testimoniano anche le ortofoto AGEA reperibili sul S.I.T. della Regione Puglia).

Documentazione fotografica AOI 1

Le prime due immagini sono state ottenuta mediante rilievo effettuato ad un'altezza di 30 metri, le altre sono state acquisite ad un'altezza di circa 5 metri dal suolo.





Documentazione fotografica AOI 2

5.2 Risultati ottenuti dal secondo campione di dati (immagini da UAV)

Lo scopo dell'acquisizione di un secondo campione di dati è duplice:

1. In primo luogo avere un riscontro dei risultati ottenuti a seguito di analisi delle immagini aeree RGB e CIR fornite dalla CGR per poter valutare la congruenza delle soglie fissate per ciascuno dei 4 IV considerati e

segnalare ulteriori IV utili con riferimento a quelli elencati nel Paragrafo 4.4;

2. In secondo luogo valutare l'efficacia dei sensori multispettrali montati su UAV per l'individuazione di piante affette da Xylella fastidiosa al fine di poter, quanto meno, in una fase di screening inziale, direzionare le analisi chimiche svolte sui singoli alberi da parte dell'osservatorio fitosanitario, le quali, ad oggi, sono le uniche a dare una certezza circa lo stato di salute della pianta.

Le immagini acquisite sono state analizzate impiegando 3 softwares differenti, al fine di poter avere un risultato quanto più certo possibile e quindi cercare, se possibile, di definire una correlazione tra rilievi speditivi con sensori multispettrali e analisi di laboratorio, al fine di poter rendere più agevole la ricerca della malattia.

Il primo processamento è stato eseguito impiegando il programma fornito dalla stessa casa di produzione del Phantom 4 Multispectral, DJI Terra. Il software calcola in automatico 5 IV: NDVI, GNDVI, LCI, NDRE e OSAVI. Questo primo step ha permesso di poter escludere quali tra questi indici non fornissero un output che permettesse di discretizzare facilmente i vari elementi dell'immagine (alberi, suolo, ombre, strade). La visualizzazione a schermo ha confermato il risultato ottenuto per le immagini aeree: gli IV migliori tra i 5 calcolati automaticamente dal software sono stati GNDVI e OSAVI.

Successivamente, le immagini acquisite sono state importate in Pix4D mapper, un software di fotogrammetria automatica impiegato nel mapping professionale per acquisizioni con UAV. Considerate le funzionalità offerte, in linea con gli obiettivi del presente lavoro, si è deciso di utilizzare tale software, user-friendly, nell'analisi computazionale: per calcolare tutti gli IV riportati nel Paragrafo 3.2. Gli output ottenuti hanno trovato riscontro con le index maps generate automaticamente da DJITerra e, anche per questo

campione di dati, gli IV migliori, in termini di discretizzazione tra ombre, suolo e alberi, si sono riconfermati GNDVI, BNDVI, OSAVI e ARVI.

È stata fatta, dunque, una terza verifica di calcolo, esportando le immagini acquisite (5 per ciascuna area di interesse, acquisite nelle 5 diverse bande riportate in Tabella 4.4) nel software ArcMap 10.4.1. I valori degli IV, computati attraverso il Tool "Raster Calculator", sono risultati confrontabili con i valori ottenuti nell'elaborazione eseguita mediante gli altri 2 softwares.

Si riportano di seguito l'index map ottenuta per l'IV OSAVI per l'AOI 3 impiegando i 3 differenti softwares (Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12).

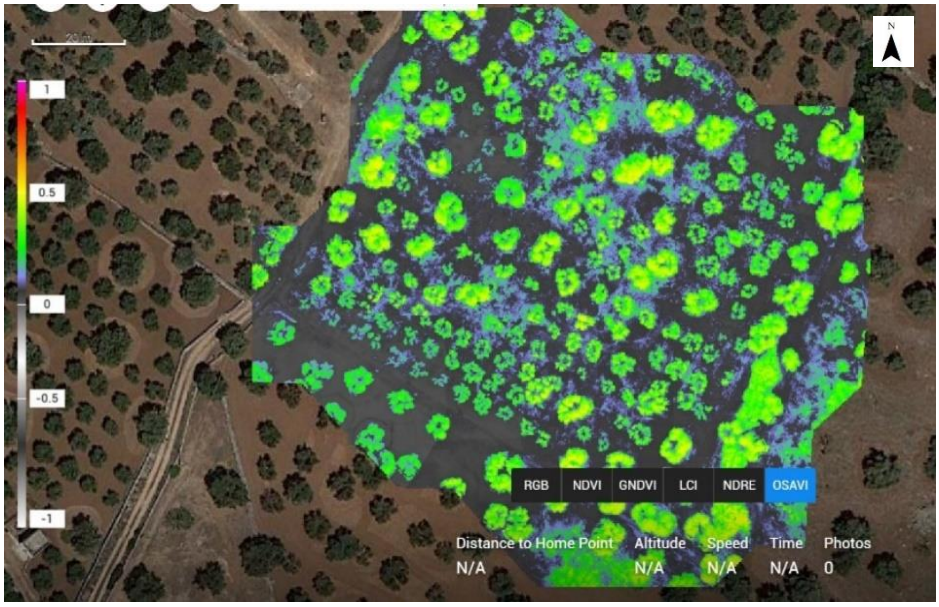


Figura 5.10: Index Map OSAVI, AOI3 – DJI Terra

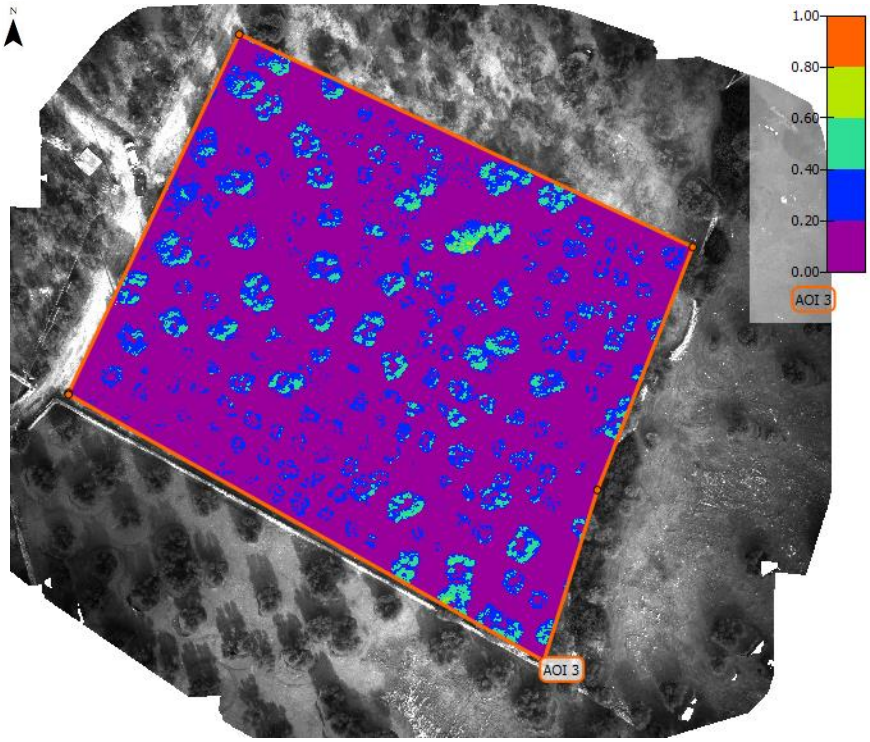


Figura 5.11: Index Map OSAVI, AOI13– Pix4D

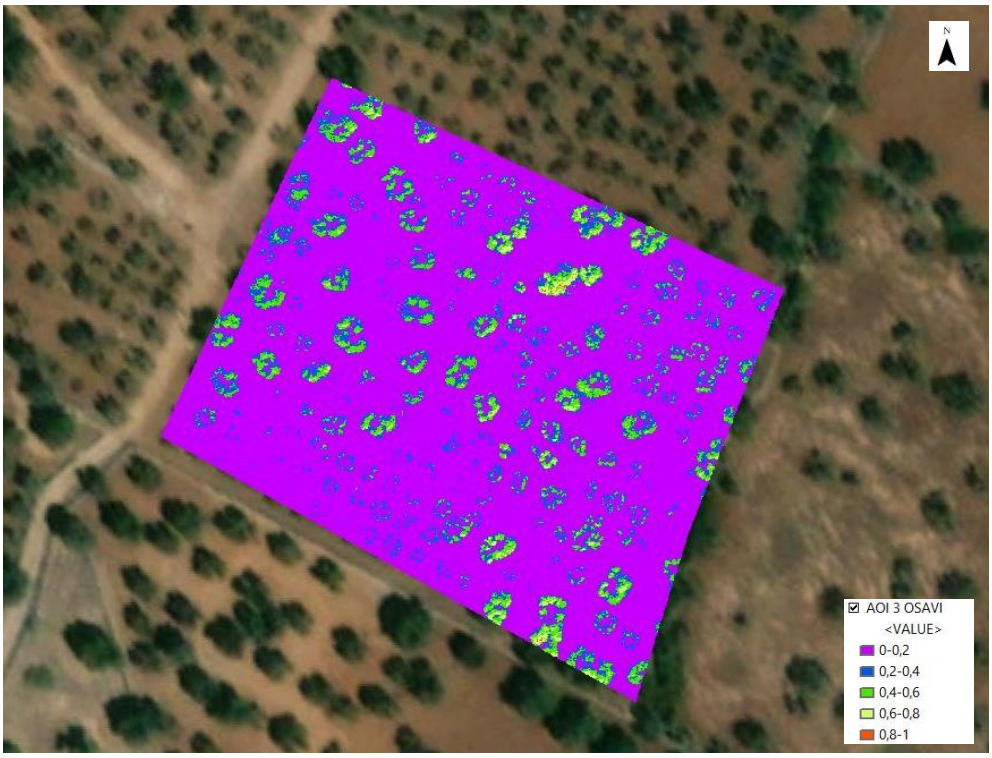


Figura 5.12: Index Map OSAVI, AOI3 – ArcMap

A questo punto per verificare le soglie degli IV risultanti dalle analisi delle immagini aeree, è stato anzitutto fatto un confronto tra i vari indici sulla stessa acquisizione. La prima area ad essere analizzata è quella posta più a Nord, nel comune di Fasano, in Località Torre Spaccata (AOI 3). L'oliveto non presenta alcuna sintomatologia e non ha subito alcuna variazione negativa in termini di produttività media annuale storicizzata. Sono stati valutati i range di chioma "sana" considerando "sana" tutta la chioma presente. A supporto della tesi, è stata anche valutata l'immagine acquisita nella banda del vicino infrarosso (NIR), in cui è più facile ad occhio nudo distinguere i diversi valori di riflettanza: i valori risultano più o meno omogenei su tutta la chioma (Figura 5.13).

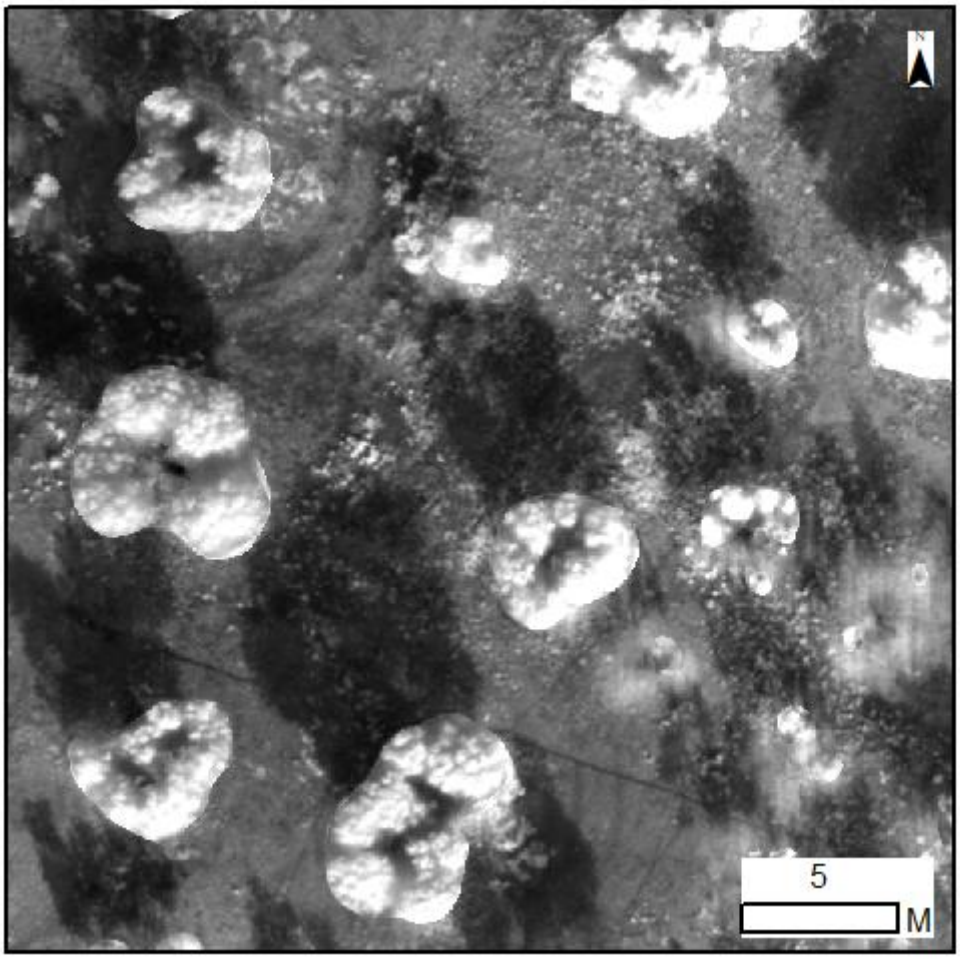


Figura 5.13: Dettaglio chioma – Banda NIR, AOI3

Le soglie degli IV, di seguito riportate, sono state valutate in funzione dell'acquisizione nella banda dell'infrarosso vicino e verificate in maniera tale che risultassero coerenti tra loro:

- GNDVI > 0.65
- BNDVI > 0.75
- ARVI > 0.50
- OSAVI > 0.25

Dunque, allo stato del presente lavoro, sembrerebbe che nessun valore soglia ottenuto dal calcolo degli IV valutati sulle acquisizioni aeree possa ritenersi confermato. Tale differenza potrebbe essere dovuta al fatto che nelle immagini aeree il valore di ciascun pixel è legato al Digital Number (DN), mentre le immagini acquisite con UAV vengono in automatico calibrate radiometricamente e, pertanto, il valore di ciascun pixel è espresso in termini di riflettenza.

Si riporta in Tabella 5.4 il confronto tra i limiti ottenuti per il primo campione di dati (immagini aeree) e quelli ottenuti per il secondo (immagini da UAV).

	Immagini aeree	Immagini da UAV
GNDVI	0.30-1.00	0.65-1.00
BNDVI	0.30-1.00	0.75-1.00
ARVI	0.20-1.00	0.50-1.00
OSAVI	0.35-1.00	0.25-1.00

Tabella 5.4: Confronto valori soglia per gli IV del primo campione di dati e del secondo campione di dati

Si mostra, a seguire, la stessa area di dettaglio riportata in Figura 5.13 su cui sono stati calcolati i 4 indici (Figura 5.14, Figura 5,15).

La porzione di chioma "sana" (che corrisponde all'intera chioma, per il motivo precedentemente spiegato), cui è associato il range in Tabella 5.4, è colorata di rosso (GNDVI), verde (BNDVI), rosa (ARVI) o giallo (OSAVI) a seconda dell'IV considerato e corrisponde alla porzione che riflette maggiormente in Figura 5.13.

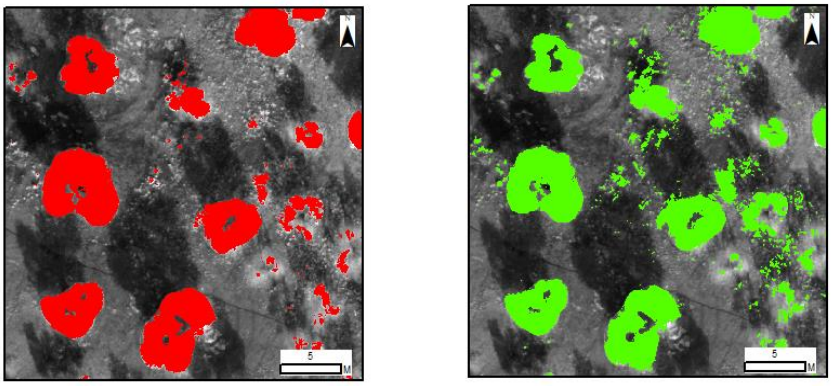


Figura 5.14: Dettaglio chioma, GNDVI>0.65 (sx) – BNDVI>0.75 (dx), AOI3

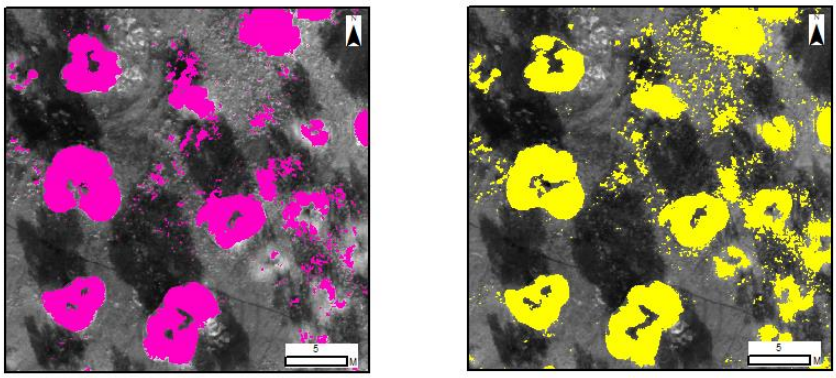


Figura 5.15: Dettaglio chioma, ARVI>0.50 (sx) – OSAVI (dx)>0.25, AOI3

Lo step successivo è stato quello di impiegare l'acquisizione sull'AOI 6, appezzamento in stato sintomatico avanzato, per validare il range di valori ottenuto dall'analisi del campione di dati acquisito sull'AOI 3. Infatti, dal confronto visivo tra le 4 aree rilevate, lo stato sintomatico degli olivi della

presente area è senza dubbio il peggiore. Pertanto, se l'AOI 3 è stata assunta come riferimento di appezzamento "sano" sul quale tarare le soglie limite degli IV, l'AOI 6 è stata impiegata come riferimento "malato", per poter avere un riscontro circa i valori riportati in Tabella 5.4.

L'AOI 6 si trova nel comune di San Pietro Vernotico, in provincia di Brindisi, al confine con la Provincia di Lecce. Nell'area non sono state eseguite analisi di laboratorio, tuttavia, data la posizione geografica e il periodo storico in cui questi hanno iniziato a manifestare i primi sintomi, è possibile parlare di un'alta probabilità di infezione causata dal batterio killer.

È stato eseguito un duplice volo nadirale, il primo a 70 (come per le altre aree) ed il secondo a 30 metri rispetto al piano campagna per potere valutare eventuali discrepanze tra le acquisizioni fatte ad altezze differenti. Quasi tutti gli olivi, come ci si aspettava, hanno mostrato delle "anomalie". In aggiunta ai 2 rilievi, sono state eseguite delle foto di dettaglio ad un'altezza di 15 metri dal suolo su 8 alberi, tutti in uno stato avanzato di disseccamento.

Gli alberi su cui sono state fatte delle acquisizioni alla scala della singola chioma, sia verticalmente che lateralmente, sono segnati in giallo in Figura 5.16.

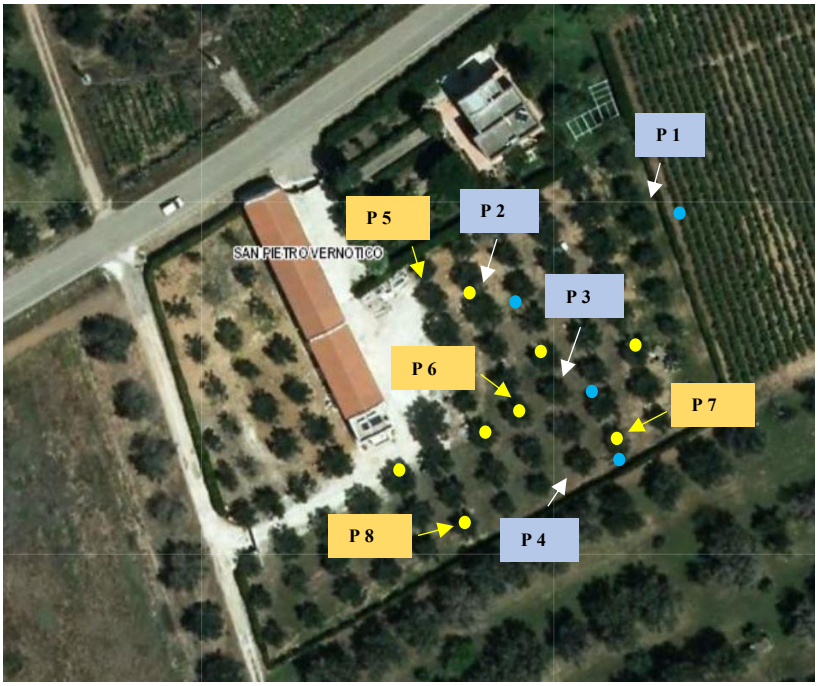


Figura 5.16: AOI 6

Gli alberi segnati in giallo sono quelli sui quali sono state eseguite acquisizioni di dettaglio. Gli alberi segnati in celeste sono quelli sui quali è stato fatto un confronto tra le acquisizioni a 30 e a 70 metri.

Posti i valori soglia (Tabella 5.4) come discriminante tra porzione sana e porzione potenzialmente malata, le analisi computazionali hanno prodotto i seguenti risultati:

- I valori soglia, tarati sull'oliveto sano (AOI 3), sono stati confermati nonostante gli oliveti siano costituti da alberi differenti sia in termini di varietà che di età: i valori degli IV al di sotto del limite imposto identificano correttamente i rami secchi e anche quei rami verdi (situati prevalentemente nella parte superiore della chioma) in cui si presume si abbia un deficit di linfa legato all'ostruzione dei vasi xylematici a causa della malattia.
- L'acquisizione a 30 metri, indubbiamente, permette di avere una maggiore precisione nel dettaglio rispetto ad un rilievo eseguito a 70 m; tuttavia alla macro-scala della chioma le differenze risultano minime.

- Le acquisizioni a 15 metri permettono di individuare, alla scala del singolo ramoscello, i valori sotto-soglia. Pertanto possono essere impiegate in una fase successiva a quella delle acquisizioni speditive a 70 e 30 metri per verificare se il valore "anomalo" è associato ad un ramo verde o ad uno che già presenta disseccamento.

Si riportano, di seguito, a titolo esemplificativo:

- Le catture di dettaglio relative agli alberi segnati in celeste in Figura 5.16, in cui si mostra la differenza, in termini di valori sopra soglia (porzione di chioma colorata) per ciascun IV, per le acquisizioni nadirali eseguite a 70 e a 30 metri (Figura 5.17, Figura 5.18);
- Le catture di dettaglio relative ad alcuni tra gli alberi segnati in giallo in Figura 5.16. Sono stati selezionati 4 olivi (P5, P6, P7, P8) e per ciascuno è stato rappresentato:
    a. Output in scala di grigi dell'analisi computazionale eseguita rispetto ai 4 IV sull'acquisizione nadirale a 70 metri: tale visualizzazione permette di identificare con maggiore chiarezza i "buchi" presenti nella chioma cui sono associate le *anomalie*;
    b. Output derivante dall' dell'analisi computazionale eseguita rispetto ai 4 IV sull'acquisizione nadirale a 70 metri, in cui è colorata solo la porzione di chioma "sana" associata ai valori sopra soglia (Tabella) e, pertanto, *non anomali*;
    c. Acquisizione a colori reali eseguita in posizione nadirale a 15 metri dal suolo, in cui è colorata solo la porzione di chioma associato al range "sano", variabile per ciascun IV;
    d. Acquisizione a colori reali eseguita in posizione frontale rispetto alla chioma a 15 metri dal suolo, in cui è colorata solo la porzione di chioma associato al range "sano", variabile per ciascun IV.
    e.

OLIVO P 1 **OLIVO P 2**

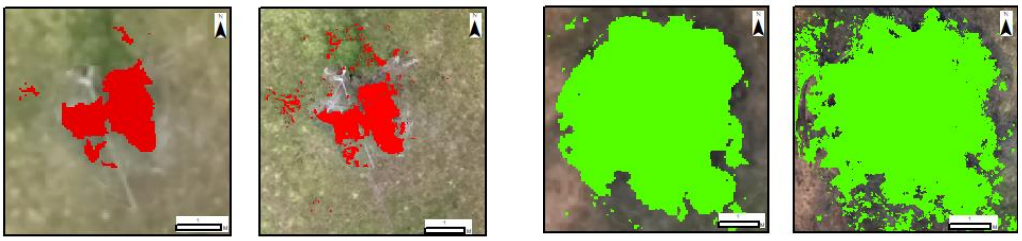


Figura 5.17: GNDVI >0.65 – P1 (rosso) 30 m (sx) -70 m (dx), BNDVI >0.75 – P2 (verde) 30 m (sx) -70 m (dx)

OLIVO P 3 **OLIVO P 4**

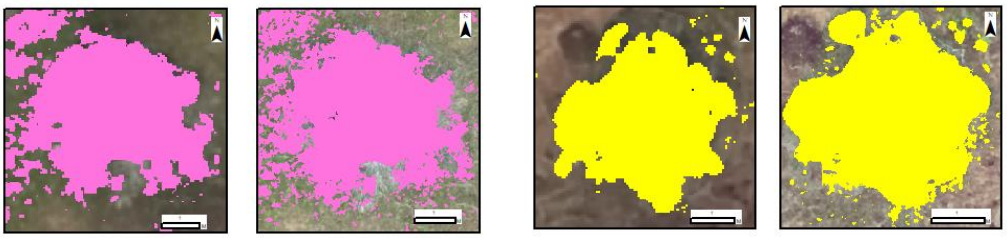


Figura 5.18: ARVI >0.50 – P3 (rosa) 30 m (sx) -70 m (dx), OSAVI >0.25 – P4 (giallo) 30 m (sx) -70 m (dx)

Avendo appurato che la differenza tra le due acquisizioni è minima e non determinante in termini di segnalazione di anomalie, per avere continuità e coerenza tra i risultati delle varie aree considerate, si è deciso di riportare di seguito solo gli output relativi all'analisi computazionale eseguita sulle immagini a 70 metri.

OLIVO P 5

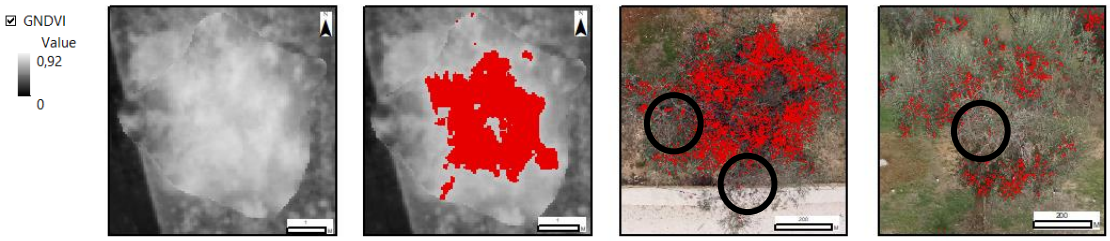


Figura 5.19: GNDVI – P5

Da sinistra: GNDVI scala di grigi-70 metri, GNDVI>0.65-70 metri, GNDVI>0.65-15 metri nadirale, GNDVI>0.65-15 metri laterale

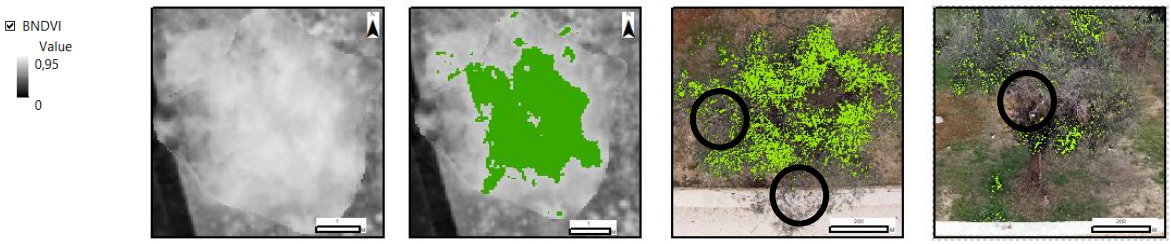


Figura 5.20: BNDVI >0.75 – P5

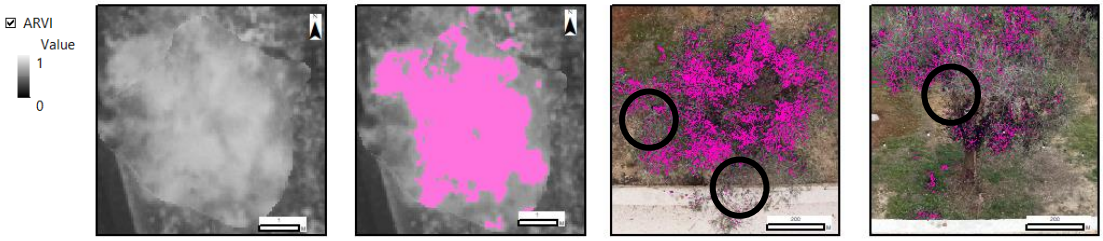


Figura 5.21: ARVI >0.50 – P5

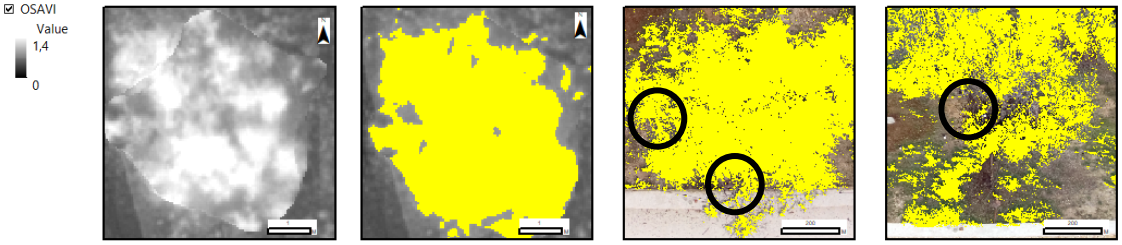


Figura 5.22: OSAVI >0.25 – P5

OLIVO P 6

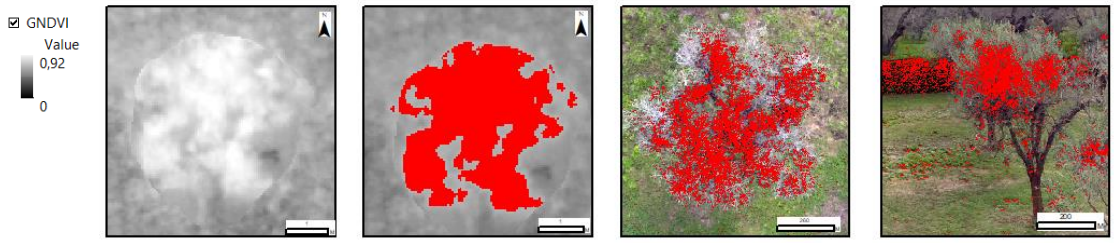


Figura 5.23: GNDVI – P6

Da sinistra: GNDVI scala di grigi-70 metri, GNDVI>0.65-70 metri, GNDVI>0.65-15 metri nadirale, GNDVI>0.65-15 metri laterale

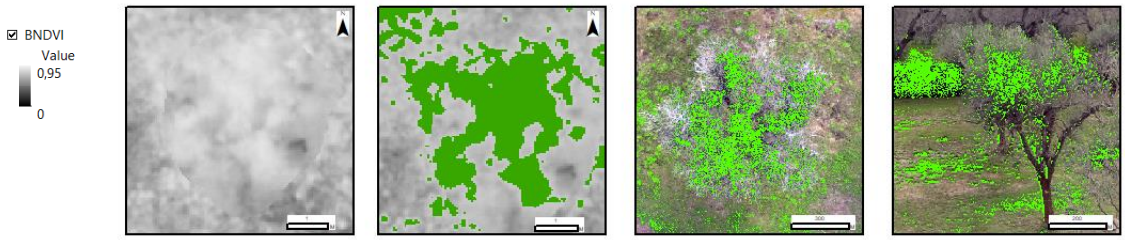


Figura 5.24: BNDVI >0.75 – P6

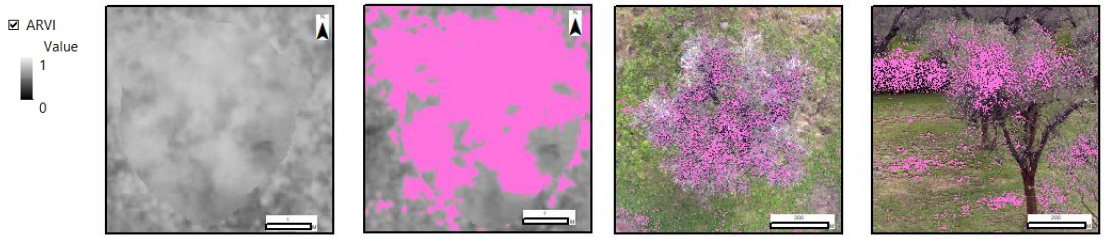


Figura 5.25: ARVI >0.50 – P6

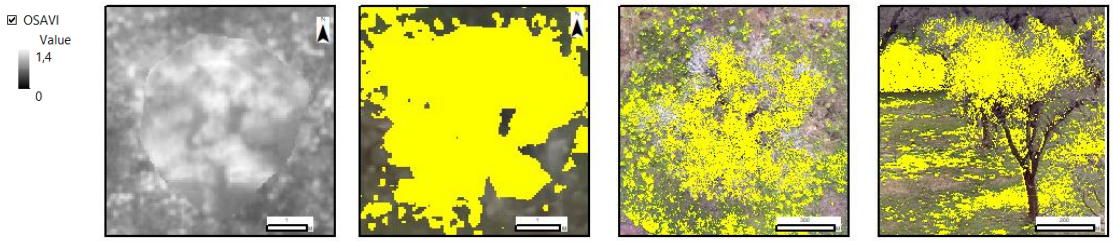


Figura 5.26: OSAVI >0.25 – P6

OLIVO P 7

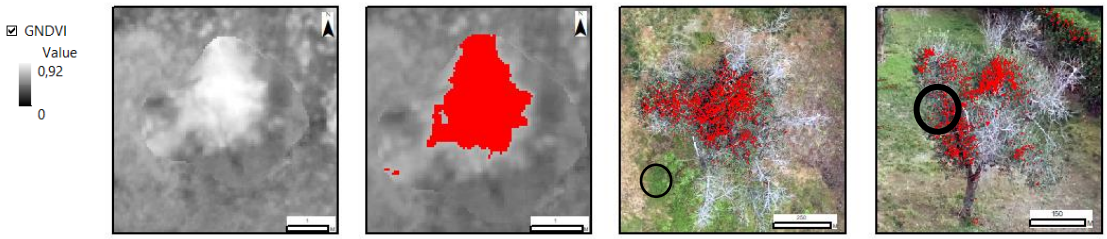


Figura 5.27: GNDVI – P7

Da sinistra: GNDVI scala di grigi-70 metri, GNDVI>0.65-70 metri, GNDVI>0.65-15 metri nadirale, GNDVI>0.65-15 metri laterale

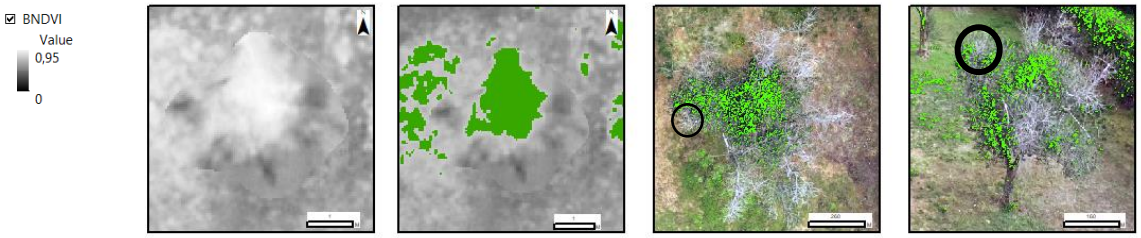


Figura 5.28: BNDVI >0.75 – P7

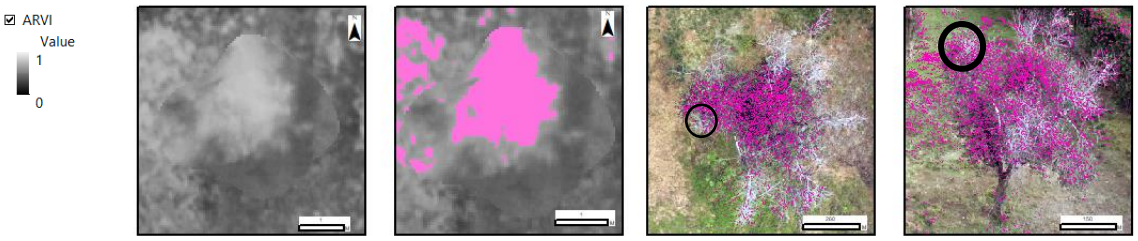


Figura 5.29: ARVI >0.50 – P7

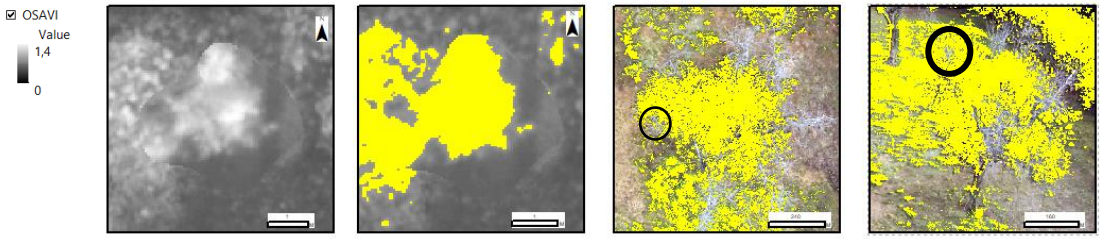


Figura 5.30: OSAVI >0.25 – P7

OLIVO P 8

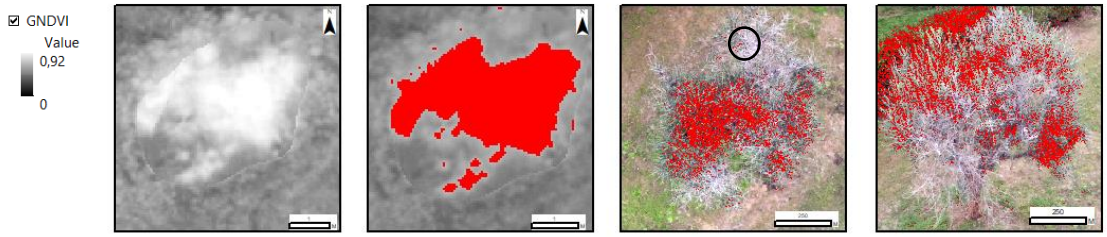


Figura 5.31: GNDVI – P8

Da sinistra: GNDVI scala di grigi-70 metri, GNDVI>0.65-70 metri, GNDVI>0.65-15 metri nadirale, GNDVI>0.65-15 metri laterale

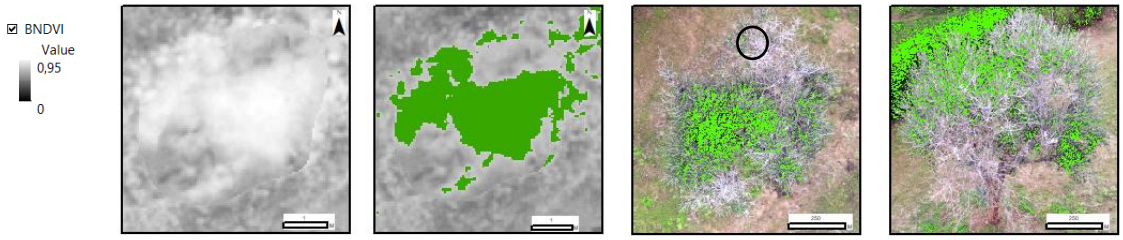


Figura 5.32: BNDVI >0.75 – P8

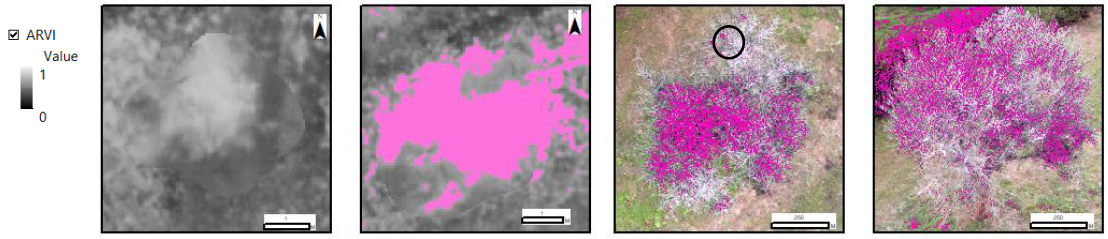


Figura 5.33: ARVI >0.50 – P8

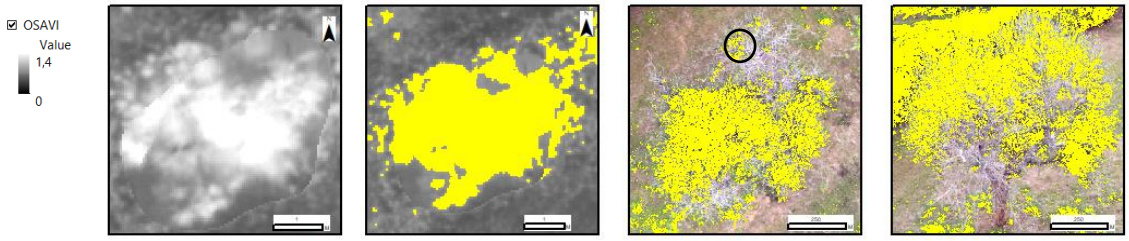


Figura 5.34: OSAVI >0.25 – P8

Tra i 4, l'indice OSAVI (Figura 5.22, Figura 5.26, Figura 5.30, Figura 5.34) è quello che ha prodotto dei risultati meno allarmanti e, soprattutto, non corretti in alcuni casi. Infatti, oltre a non essere d'aiuto nell'individuazione di eventuali alberi malati non sintomatici, il valore soglia posto non consente di classificare in maniera opportuna neppure le parti che già presentano disseccamento evidente ad occhio nudo: sono stati messi in evidenza, mediante cerchi, i rami secchi che risultano correttamente "malati" (e pertanto non colorati) se si fa riferimento al GNDVI, BNDVI, ARVI, mentre sono classificati come chioma "sana" (e pertanto colorata) se si considera l'indice OSAVI.

Dunque, nell'ottica del monitoraggio, fine ultimo del presente lavoro, se la conclusione cui si è giunti per l'OSAVI dovesse trovare riscontro anche per gli altri appezzamenti, si ritiene opportuno escluderlo dalli lista degli IV idonei all'individuazione di "anomalie".

L'AOI5 (Ostuni) è costituita da un appezzamento di circa 1.5 ha di olivi di Ogliarola secolari che rientrano nella Piana degli Olivi Monumentali. Da circa un anno (2021) sono apparsi i primi sintomi riconducibili alla malattia, che puntualmente sono stati eliminati tramite potatura. Pertanto non è stato possibile rilevare la presenza di rami insecchiti se non in piccolissima parte (Figura 4.20).

Si riporta una mappa dell'area in cui sono stati segnati in arancione gli olivi che hanno presentato delle anomalie a seguito di analisi computazionale (Figura 5.35) e alcuni zoom alla scala della chioma del singolo albero per i diversi IV per alcuni degli alberi presenti in mappa.

Anche in questo caso, gli olivi identificati come anomali non presentavano quasi disseccamento (sulla chioma); pertanto la porzione di chioma potenzialmente "malata" associata alla parte non colorata (da Figura 5.36 a Figura 5.47), come rilevato dal sensore multispettrale, non significa esclusivamente rami secchi, ma include anche rami verdi.

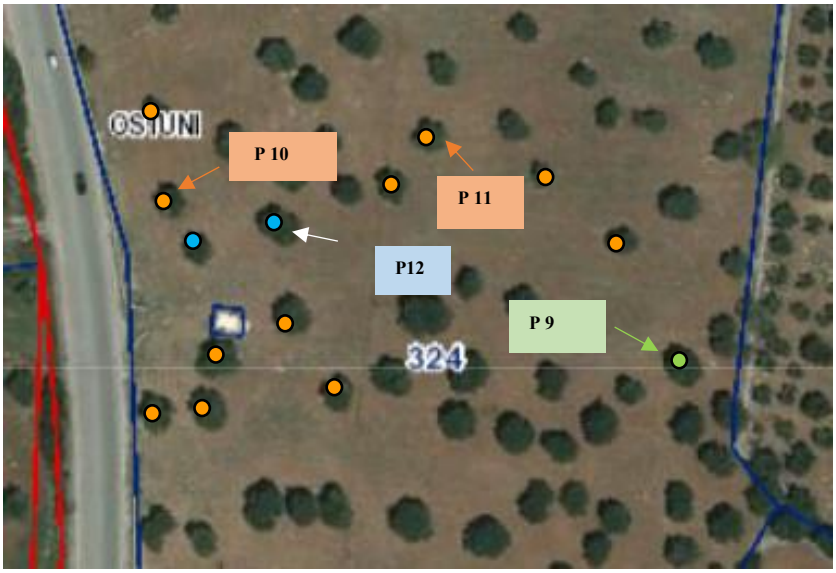


Figura 5.35: AOI5, verifica degli output degli IV.

Gli alberi segnati in arancione sono quelli che hanno presentato anomalie a seguito di analisi computazionale, pur non presentando alcun sintomo di disseccamento ben visibile ad occhio nudo; l'albero segnato in verde è uno tra quelli che non ha presentato alcuna anomalia e pertanto può essere considerato come sano; gli alberi segnati in celeste sono quelli per i quali sono state eseguite delle foto di dettaglio ad un'altezza di 15m rispetto al suolo.

Si riportano di seguito delle catture di dettaglio di 3 olivi ricadenti all'interno dell'area: la chioma del P9 (uno degli olivi che non hanno presentato anomalie) appare completamente "sana", mentre quella degli alberi P10 e P11 risulta essere in uno stato di "compromissione" avanzato, in termini di malattia, pur non essendo tale compromissione visibile od occhio nudo (Figura 5.40, Figura 5.44).

OLIVO P 9

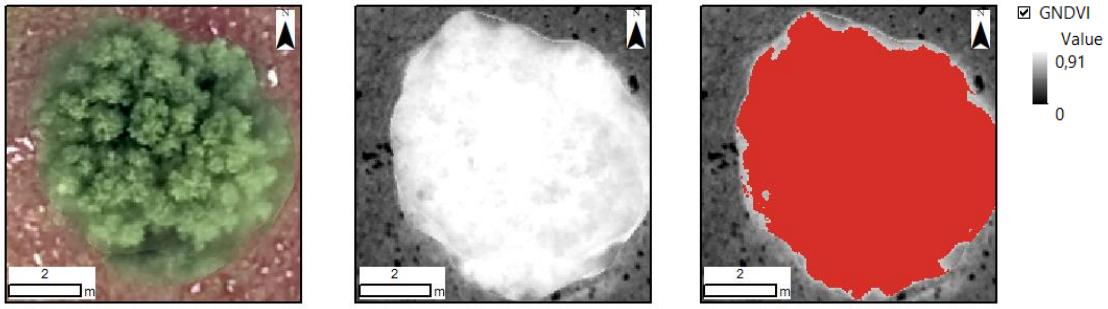


Figura 5.36: P9 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65

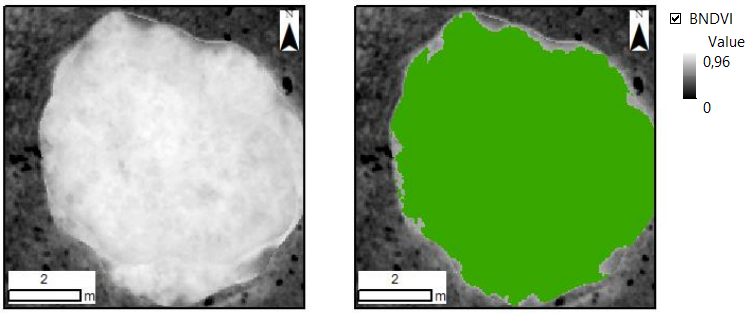


Figura 5.37: P9 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75

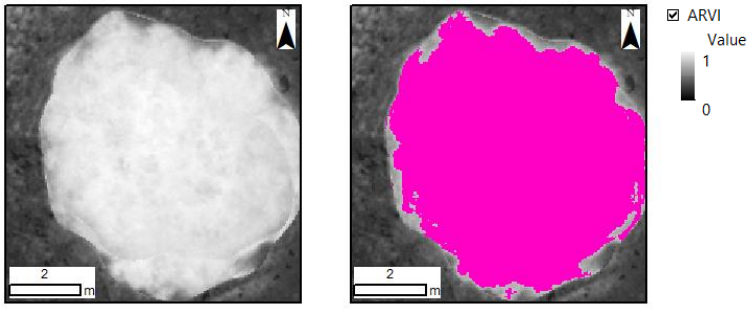


Figura 5.38: P9 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50

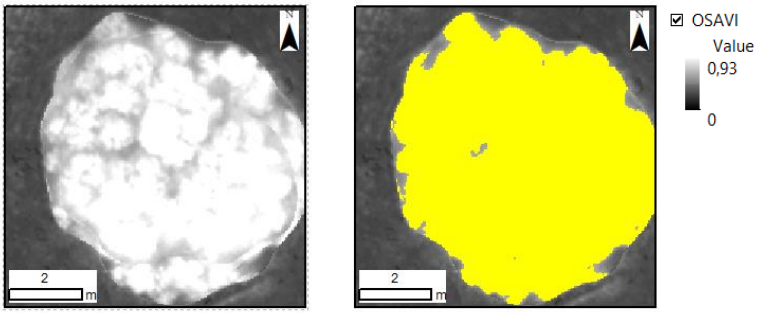


Figura 5.39: P9 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25

OLIVO P 10

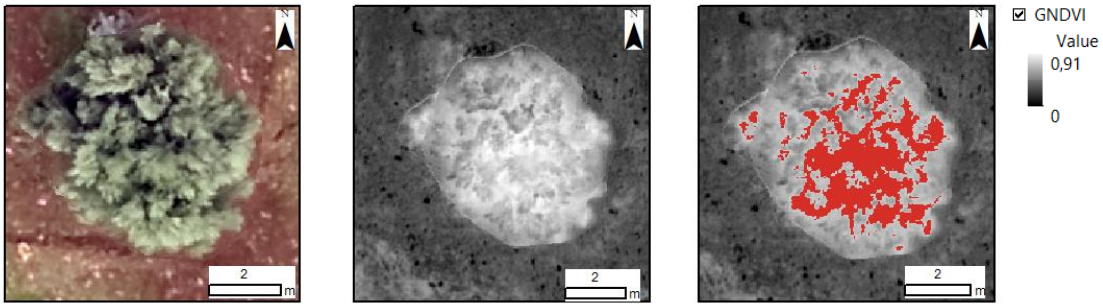


Figura 5.40: P13 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65

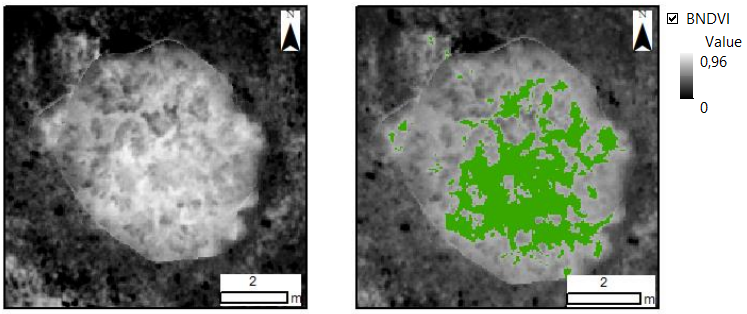


Figura 5.41: P13 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75

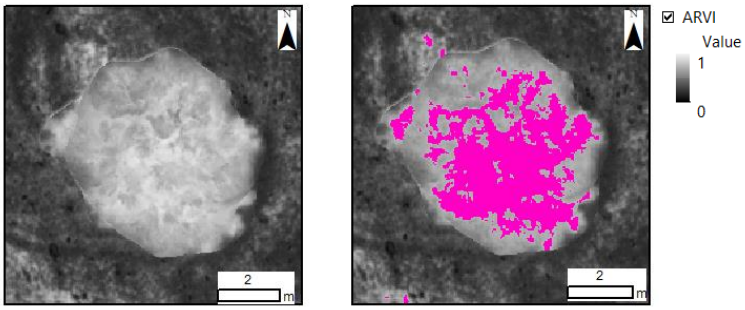


Figura 5.42: P13 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50

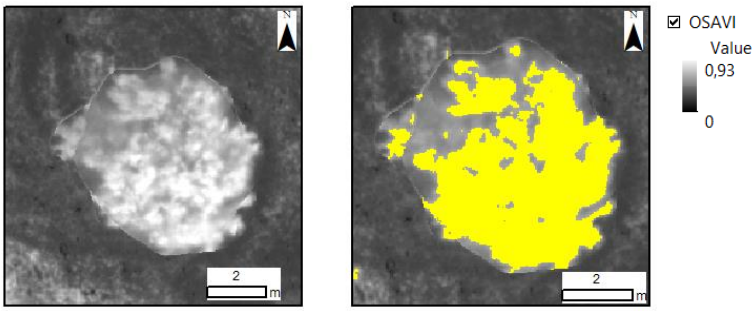


Figura 5.43: P13 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25

OLIVO P 11

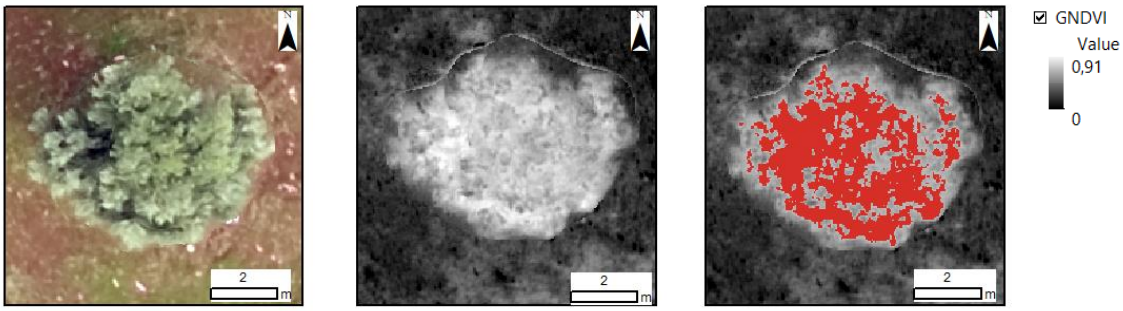


Figura 5.44: P13 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65

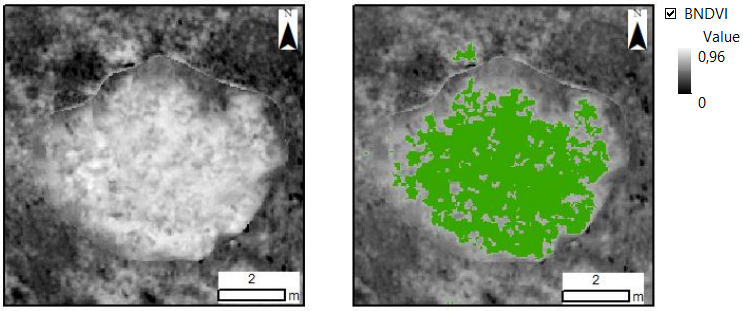


Figura 5.45: P13 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75

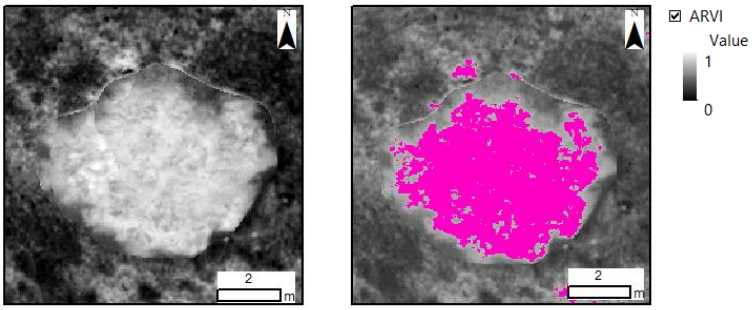


Figura 5.46: P13 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50

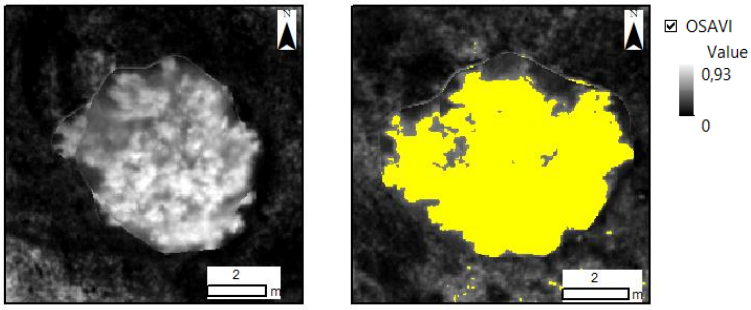


Figura 5.47: P13 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25

Anche in questo caso, l'indice OSAVI (Figura 5.39, Figura 5.43, Figura 5.47), ha prodotto dei risultati differenti, meno allarmanti e non coerenti rispetto agli output degli altri indici, non riuscendo a cogliere con esattezza le anomalie.

Inoltre, appare evidente che l'indice ARVI (Figura 5.38, Figura 5.42, Figura 5.46), pur mostrando un output similare a quello del GNDVI, BNDVI, in termini è più cautelativo rispetto agli altri 2, in termini di segnalazione di eventuali anomalie. Pertanto, avendo tale risultato trovato riscontro nelle altre 2 aree e tenendo presente i fini ultimi della presente analisi, ossia il monitorare, l'"allarmare" (con cognizione di causa) e il direzionare le indagini a terra, **si** ritiene opportuno, qualora il risultato venisse confermato anche per l'ultima area (AOI 4), escludere sia l'indice OSAVI sia l'indice ARVI dalla lista dei 4 IV considerati sino a questo punto.

In aggiunta alle acquisizioni nadirali a 70 metri, sono state fatte delle acquisizioni di dettaglio su 2 olivi (segnati in celeste in Figura 5.35), ad un'altezza di circa 10 metri da suolo in posizione frontale rispetto alla chioma. Sono stati scelti valutando le fronde secche presenti (Figura 4.20). Il calcolo degli IV (GNDVI, BNDVI, ARVI, OSAVI) non ha prodotto alcun risultato di particolare interesse (Figura 5.48, Figura 5.49), ad eccezione del fatto che lo stesso risultato è coerente con l'acquisizione nadirale a 70 metri, dalla quale nessuno di questi 2 alberi era stato identificato come anomalo.

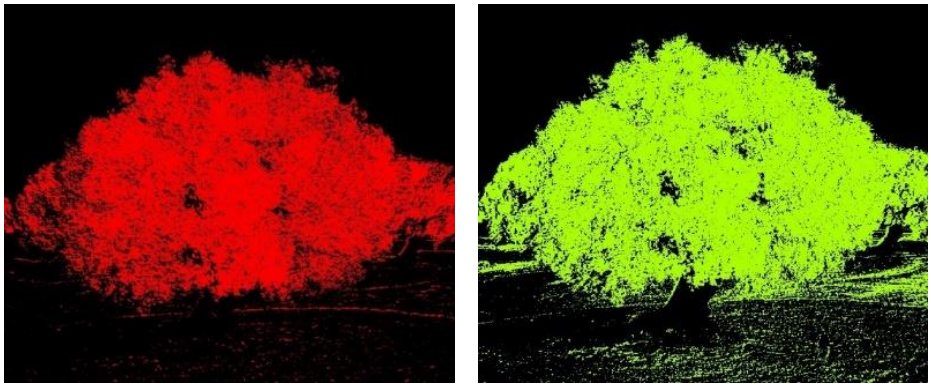


Figura 5.48: P12 - GNDVI >0.65, BNDVI>0.75

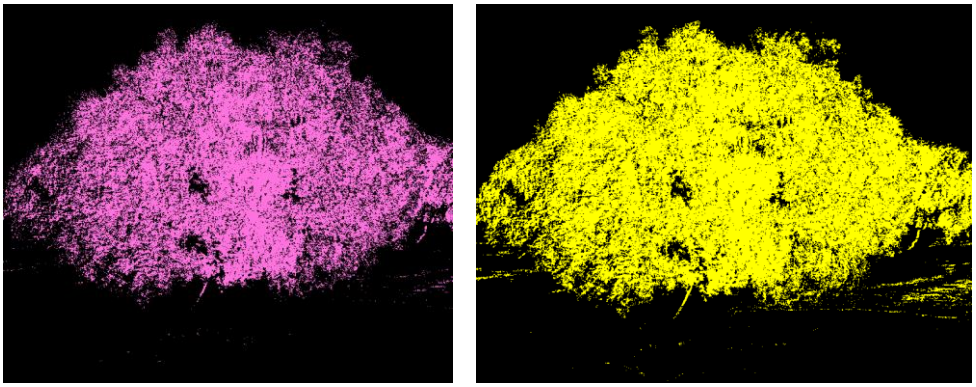


Figura 5.49: P12 – ARVI>0.50, OSAVI >0.25

L'AOI 4 è situata anch'essa nel comune di Fasano, in località Torre Canne. Si tratta di un piccolo appezzamento di terreno, di estensione pari a 0.3 ha, costituito da circa 15 alberi di olivo, di varietà Ogliarola di età differente. Nell'anno 2020, a seguito di analisi chimiche, sono state espiantati 4 olivi che si trovavano nella stessa area perché risultati positivi alla malattia. Al momento, nell'anno 2021, sono state eseguite altre analisi su 10 di questi alberi: 3 sono risultati negativi, 7 erano in attesa di referto al momento del rilievo (25 ottobre 2021). Tutti gli olivi presenti nel campo hanno abbondanti frutti. L'interpretazione degli output legati al calcolo degli IV è stata eseguita tenendo in considerazione 2 dei 3 alberi le cui analisi chimiche hanno dato una risposta negativa (indicati con un triangolo verde in Figura 5.50). Il risultato interessante è stato rilevato nel colore non omogeno della chioma negli output di 2 olivi (P14, P15, indicati in arancione in Figura 5.50): alcune porzioni sono al di sotto dei valori soglia (Tabella 5.4). Di questi 2 olivi, uno (P14) è quello che presenta alcuni ramoscelli secchi visibili ad occhio nudo sulla parte laterale; tuttavia la chioma, vista dall'alto, non presentava alcun sintomo di disseccamento visibile (Figura 5.15).

Figura 5.50: AOI3, stato del monitoraggio visivo (in campo) e chimico (in laboratorio) (pre-aggiornamento del 4 novembre 2021).

Gli alberi segnati in verde sono quelli risultati negativi alle analisi di laboratorio; quelli segnati in azzurro sono quelli per i quali si attende le esito delle analisi; quelli segnati in arancione sono quelli che hanno presentato anomalie a seguito di analisi computazionale. (Figura 4.13)

Per ciascuno dei 3 olivi (P13, P14, P15) si riporta:

- Acquisizione a colori reali (acquisizione RGB), la quale mostra che nessuno dei 3 olivi evidenzia dei segni di disseccamento visibili ad occhio nudo;
- Output derivante dal calcolo dei 4 indici (GNDVI, BNDVI, ARVI, OSAVI) in scala di grigi, in cui si vedono chiaramente dei "buchi" cui sono associate le *anomalie*;
- Output derivante dal calcolo dei 4 indici (GNDVI, BNDVI, ARVI, OSAVI), in cui è colorata solo la porzione di chioma associata ai valori sopra soglia (Tabella).

OLIVO P 13

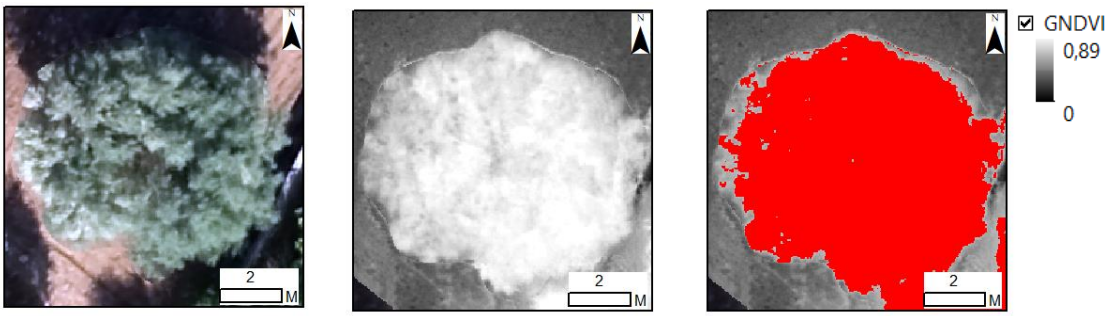


Figura 5.51: P13 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65

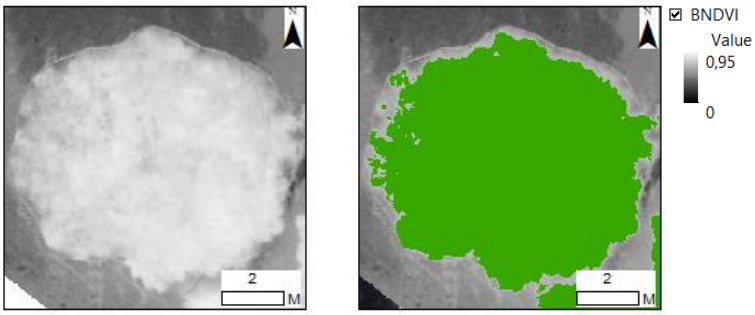


Figura 5.52: P13 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75

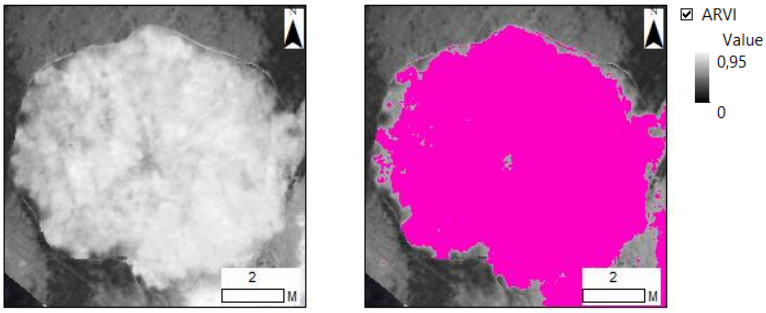


Figura 5.53: P13 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50

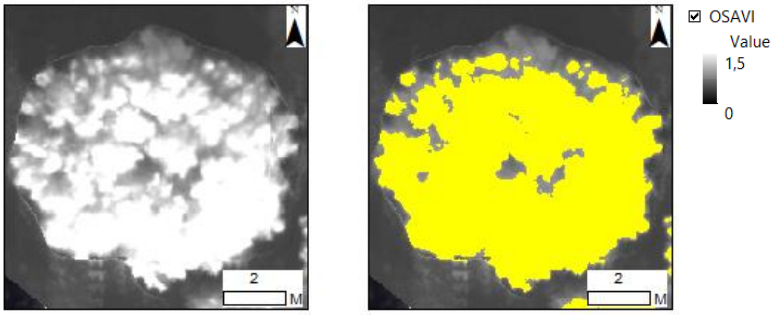


Figura 5.54: P13 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25

OLIVO P 14

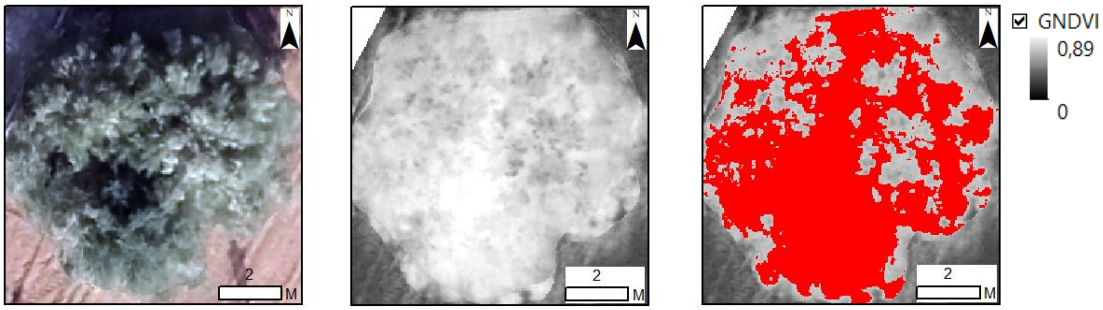


Figura 5.55: P14 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65

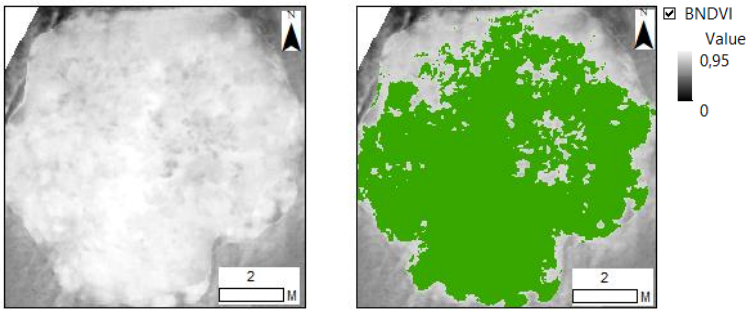


Figura 5.56: P14 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75

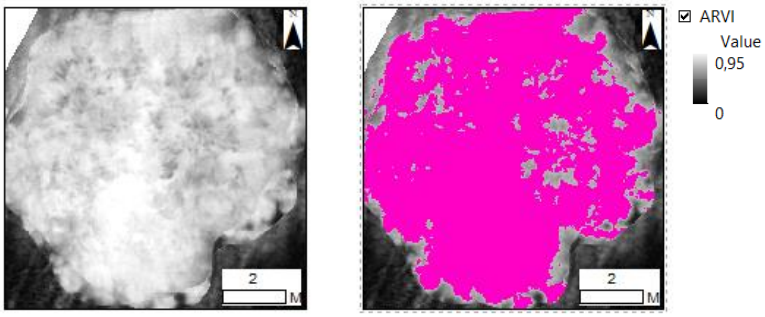


Figura 5.57: P14 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50

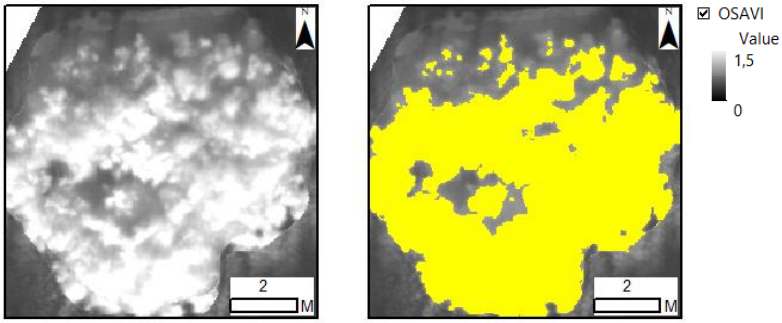


Figura 5.58: P14 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25

OLIVO P 15

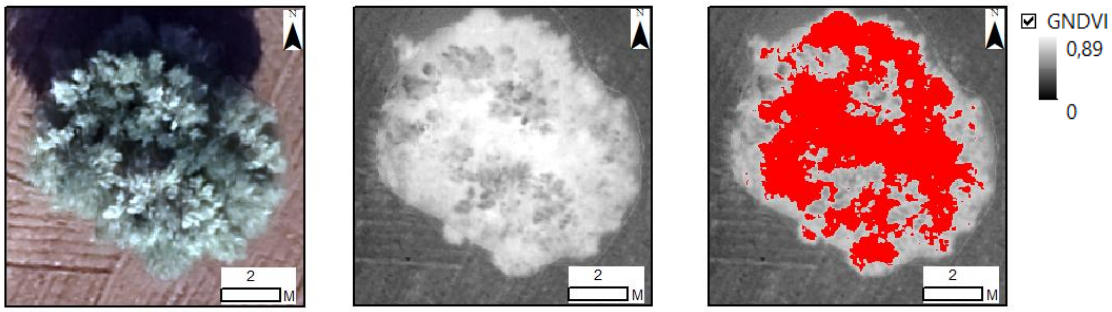


Figura 5.59: P15 – Da sinistra: Acquisizione RGB, GNDVI scala di grigi, GNDVI>0.65

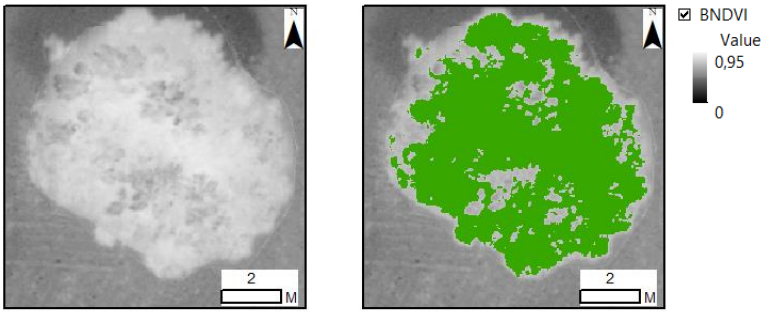


Figura 5.60: P15 – BNDVI scala di grigi, BNDVI>0.75

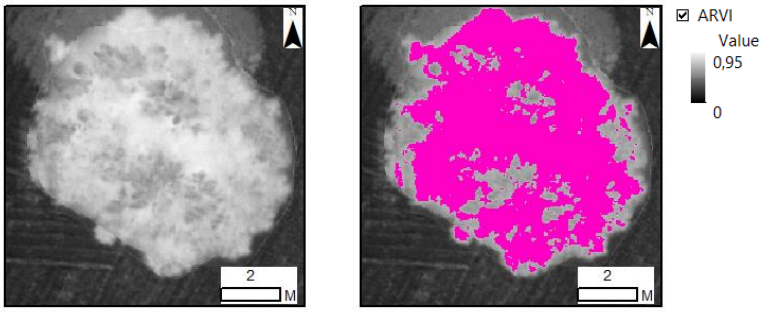


Figura 5.61: P15 – ARVI scala di grigi, ARVI>0.50

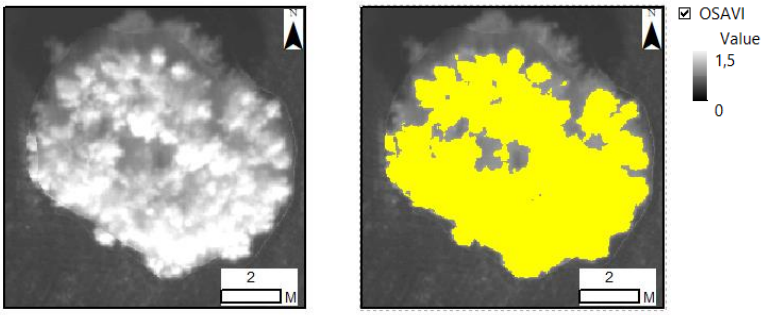


Figura 5.62: P15 – OSAVI scala di grigi, OSAVI>0.25

In aggiunta alle acquisizioni nadirali a 70 metri, sono state fatte delle acquisizioni di dettaglio sull'olivo che manifestava disseccamento (P14), ad un'altezza di circa 15 metri da suolo in posizione frontale rispetto alla chioma.

Per l'albero (Figura 5.63) sono stati calcolati i 4 IV. Le immagini rappresentano tutte la medesima chioma (P14) ed è evidenziato con un cerchio il ramo secco visibile ad occhio nudo.

Figura 5.63: Dettaglio olivo P14 – AOI3

Figura 5.64: GNDVI >0.65 (sx), BNDVI >0.75 (dx), P14

Figura 5.65: ARVI >0.50 (sx), OSAVI >0.25 (dx), P14

Analizzando gli output ottenuti sia dalle acquisizioni a 70 m sia da quelle a 15 m, si può concludere che:

- l'indice OSAVI ha prodotto dei risultati meno allarmanti e non ha identificato correttamente e nella loro totalità i rami secchi;
- l'indice ARVI è risultato più cautelativo rispetto al GNDVI e BNDVI, in termini di segnalazione di eventuali anomalie: la porzione di chioma "sana", e quindi sopra soglia, è maggiore.

Per quanto riguarda il risultato relativo all'indice OSAVI, esso trova riscontro nelle analisi computazionali svolte in tutte le aree di interesse: in particolare nell'AOI 6 si vede chiaramente, in più acquisizioni di dettaglio a 15 m, che i rami secchi non rientrano nei valori "sotto soglia".

Per quello che concerne l'indice ARVI, pur identificando correttamente il disseccamento, risulta comunque più cautelativo rispetto agli altri due; considerato che l'analisi si inserisce in una fase di screening preliminare, nell'ambito del monitoraggio degli effetti della malattia, si ritiene opportuno escludere anch'esso dalla lista degli IV fino ad ora calcolati.

Queste conclusioni portano, dunque, ad affermare la bontà delle analisi computazionali svolte sulla base degli indici BNDVI e GNDVI, in cui la banda

dell'infrarosso vicino (NIR) è normalizzata rispetto al blu (BNDVI) e al verde (GNDVI).

Il risultato ottenuto è confermato anche dal riscontro ottenuto in uno dei più recenti studi in merito, *Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species*, pubblicato il 19 Ottobre 2021 sulla rivista scientifica "Nature Communications". Lo studio si proponeva, tra l'altro, di individuare quali fossero i parametri migliori nell'identificazione della presenza del batterio nello stadio pre-sintomatico. In termini di IV, è stato osservato che le regioni dello spettro elettromagnetico più sensibili all'infezione da Xylella negli alberi d'olivo sono proprio quella del blu e del verde.

In particolare, gli IV che hanno dato risultati significativi sono stati l'indice NPQI (Normalized Phaeophytinization Index), legato alla degradazione della clorofilla-feofitina (Zarco-Tejada et al., 2018), e l'indice PRI (Photechemical Reflectance Index), sensibile alle variazioni nel ciclo del pigmento xantofilla.

$$NPQI = \frac{R_{415} - R_{435}}{R_{415} + R_{435}} \qquad \text{(Barnes et al., 1992)}$$

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}} \qquad \text{(J. Pañuelas et el., 1992)}$$

Un ulteriore, inamovibile ed importante riscontro riguardo le valutazioni fatte sull'AOI4, che hanno portato a considerare per lo meno come "anomali", in prima analisi, gli olivi P14 e P15 è giunto dai referti delle analisi di laboratorio, rese note sul sito Emergenza Xylella, in data 4 novembre 2021 (Figura 5.66), successivamente al rilievo eseguito in campo (25 ottobre 2021) e all'analisi computazionale svolta. **Dalle analisi è risultato che gli alberi P14 e P15 sono risultati positivi alla malattia. Ciò rappresenta una conferma delle correlazioni computazionali degli IV (GNDVI, BNDVI) con il rilievo eseguito con sensore multispettrale montato su UAV per rilevare, già in un primo stadio, lo stato di salute degli alberi affetti da Xylella.**

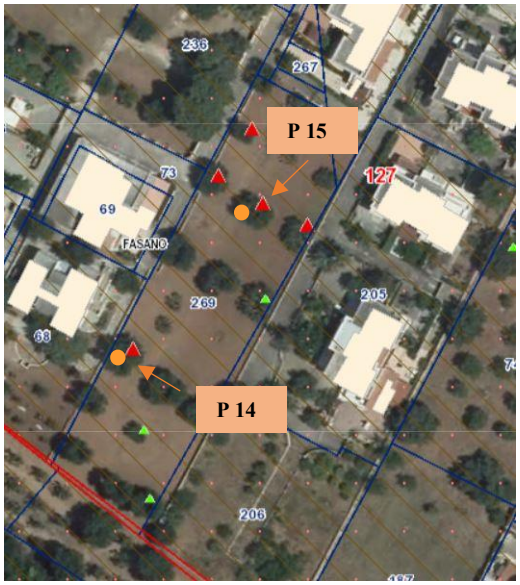


Figura 5.66: AOI3, stato del monitoraggio (post-aggiornamento del 4 novembre 2021)

Gli alberi P14 e P15, che hanno presentato delle "anomalie" a seguito di analisi computazionale, sono segnati in arancione.

In ultima analisi, per verificare la bontà del range di valori impiegato per l'analisi delle acquisizioni da UAV (Tabella 5.4), sono stati considerati 4 olivi per ciascuna delle 4 aree rilevate (AOI 3, AOI 4, AOI 5, AOI 6).

Sono stati selezionati 10 punti per albero:

- nel caso dell'AOI 3, tutti i 10 punti ricadono nella porzione di chioma sana;
- nel caso dell'AOI 4, dell'AOI 5, dell'AOI 6 sono stati considerati sia olivi (potenzialmente) sani che olivi (potenzialmente) malati: nel caso degli olivi sani tutti i 10 punti ricadono nella porzione di chioma più chiara, se si impiega la visualizzazione in scala di grigi, mentre nel caso degli olivi potenzialmente malati, sono stati presi 5 punti nella porzione più chiara e 5 punti in corrispondenza dei "buchi" (porzioni più scure nella visualizzazione in scala di grigi).

A titolo esemplificativo si riportano due catture di dettaglio alla scala della singola chioma che mostrano la modalità con la quale sono stati campionati i punti per un olivo potenzialmente sano (Figura 5.67) e per uno potenzialmente malato (Figura 5.68).

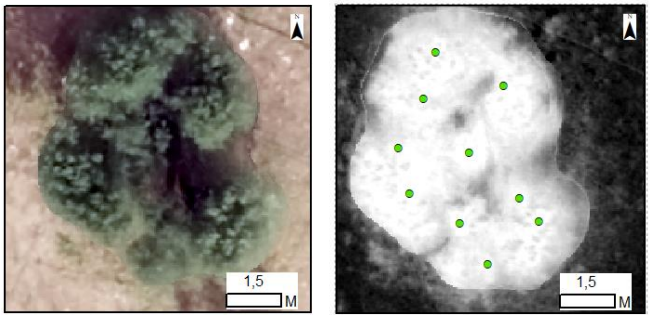


Figura 5.67: Modalità di campionamento dei punti per un olivo potenzialmente sano

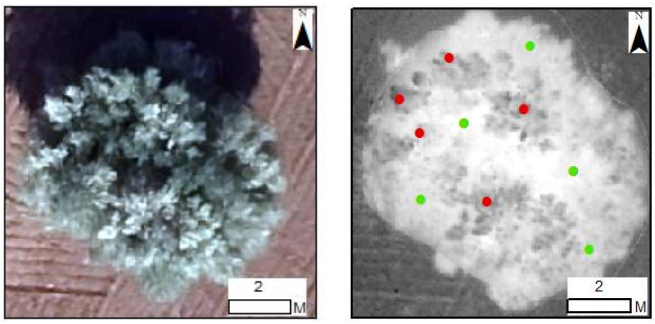


Figura 5.68: Modalità di campionamento dei punti per un olivo potenzialmente malato

È stata calcolata la media (Tabella 5.5) e la mediana (Tabella 5.6) dei valori ottenuti sia per la porzione "più chiara" (rappresentati con il colore verde) sia per quella "più scura" (rappresentati con il colore rosso).

MEDIA									
		AOI 3		AOI 4		AOI 5		AOI 6	
GNDVI	**Val. Soglia: 0.65**	0.77	-	0.74	0.52	0.69	0.51	0.76	0.55
BNDVI	**Val. Soglia: 0.75**	0.87	-	0.85	0.71	0.82	0.68	0.85	0.70
ARVI	**Val. Soglia: 0.50**	0.78	-	0.73	0.41	0.69	0.43	0.77	0.43
OSAVI	**Val. Soglia: 0.25**	0.46	-	0.57	**0.41**	0.40	**0.40**	0.51	0.21

Tabella 5.5: Media dei valori di IV

MEDIANA									
		AOI 3		AOI 4		AOI 5		AOI 6	
GNDVI	Val. Soglia: 0.65	0.77	-	0.73	0.52	0.68	0.51	0.76	0.56
BNDVI	Val. Soglia: 0.75	0.87	-	0.84	0.72	0.82	0.68	0.85	0.71
ARVI	Val. Soglia: 0.50	0.78	-	0.75	0.43	0.68	0.43	0.78	0.44
OSAVI	Val. Soglia: 0.25	0.46	-	0.56	**0.46**	0.37	**0.41**	0.54	0.22

Tabella 5.6: Mediana dei valori di IV

Sulla base dei risultati ottenuti possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- Per tutte le aree considerate i *valori in vede,* legati alla porzione potenzialmente sana della chioma, sono coerenti tra loro e con il valore soglia posto; ciò significa che indipendentemente dallo stato generale della pianta e dalla presenza o meno di un'eventuale infezione, **un valore sopra soglia** (nell'intorno dei valori medi individuati) **indica una porzione potenzialmente sana della chioma.**

- Per l'AOI 6 i *valori in rosso* sono legati al disseccamento visibile ad occhio nudo, mentre nel caso dell'AOI 4 e dell'AOI5 i *valori in rosso* sono stati rilevati in corrispondenza dei "buchi", delle anomalie individuate a seguito di analisi computazionale e non sono legati a rami secchi. I valori, cui si fa riferimento, risultano essere coerenti tra di loro per ciascun IV (ad eccezione dell'OSAVI), ciò significa che indipendentemente dal fatto che il disseccamento sia visibile o meno, **un valore sotto soglia** (nell'intorno dei valori medi individuati) **è indice di una possibile infezione/stress della pianta.**

- Il valore soglia dell'indice OSAVI, tarato sull'AOI 3 e confermato sull'AOI 6, è risultato non idoneo per le analisi condotte sull' AOI 4 e sull' AOI 5. Questa conclusione è coerente con i risultati ottenuti nel corso del presente lavoro: l'indice OSAVI non discretizza correttamente tra porzione sana e porzione potenzialmente malata.

I valori ottenuti sono risultati essere coerenti tra di loro e in linea con quanto ci si attendeva sulla base dei riscontri ottenuti, esterni al presente lavoro. Pertanto, si potrebbe pensare all'implementazione di un algoritmo di segmentazione che individui automaticamente, in funzione dei valori soglia posti per gli IV considerati e, in particolare, per il BNDVI e GNDVI, eventuali anomalie presenti sulle chiome, riconducibili ad una potenziale infezione da Xylella fastidiosa.

La seconda finalità relativa all'acquisizione del campione di dati mediante UAV era quella di dimostrare l'efficacia dei sensori multispettrali per l'individuazione di piante affette da Xylella fastidiosa al fine di poter direzionare le analisi chimiche svolte sui singoli alberi da parte dell'osservatorio fitosanitario, le quali, ad oggi, sono le uniche a dare una certezza, nella fase iniziale della malattia, circa il contagio da Xylella.

A supporto e integrazione, oltre che per onestà intellettuale, è bene precisare che i risultati ai quali si è giunti con le analisi computazionali sin qui svolte potrebbero essere ottenuti anche mediante l'impiego di altre strumentazioni, come i sensori iperspettrali, i quali esaminando più di cento bande di radiazione elettromagnetica (un sensore multispettrale, quale quello impiegato, può acquisirne 5), garantiscono risultati più raffinati al "costo" di una più complessa elaborazione, sia in termini economici (per via della strumentazione necessaria) che di tempo-lavoro (per via della mole di dati rilevati).

In ogni caso, allo stato delle attività prodotte con il presente lavoro si può, senza dubbio, **confermare la validità dell'approccio computazionale attraverso calcolo degli Indici Vegetazionali GNDVI e BNDVI mediante impiego di sensori** multispettrali per le valutazioni speditiva dello stato di salute delle piante.

6. Ipotesi di riconversione dei terreni colpiti da Xylella

Ad oggi (novembre 2021), secondo i dati ufficiali riportati su InfoXylella.it sono circa 8mila i chilometri quadrati che sono stati colpiti dalla fitopatia, distese sconfinate di terra fertile che necessitano di una riconversione che vada a mitigare (essendo, ad oggi, impossibile neutralizzare) gli effetti dell'inesorabile avanzamento dell'epidemia.

Nell'ambito del decreto legge n.27 del 2019, recante *Disposizioni urgenti in materia di rilancio dei settori agricoli in crisi* (convertito, con modificazioni, dalla legge n.44 del 2019), è stato definito, tra le altre cose, lo stanziamento di 300 milioni di euro tra il 2020 e il 2021 per l'adozione di un "Piano straordinario per la rigenerazione del settore olivicolo della Puglia". La suddivisione delle risorse tra le 2 annualità e le differenti aree di intervento è stata resa pubblica mediante D.M. del 11/06/2020 (Tabella 6.1).

	AZIONI	Milioni di €		MISURE	2020	2021	TOTALE
1	Contrasto alla diffusione della Xylella	5,00	A.	Contrasto al vettore ed eliminazione delle fonti di inoculo	2,00	3,00	5,00
2	Ripristino potenzialità produttiva	250,00	A.	Rimozione piante disseccate a seguito di Xylella nella zona infetta	5,00	15,00	20,00
			B.	Reimpianti e riconversioni tramite cultivar di olivo resistenti	14,00	26,00	40,00
			C.	Riconversioni verso altre colture	10,00	15,00	25,00
			D.	Salvaguardia olivi secolari o monumentali	1,00	4,00	5,00
			E.	Sostegno al reddito: interventi compensativi imprese agricole	85,00	35,00	120,00
			F.	Interventi compensativi in favore dei frantoi oleari	20,00	15,00	35,00
			G.	Sostegno alle imprese vivaistiche	2,00	3,00	5,00
3	Rilancio economia rurale aree danneggiate	10,00	A.	Contratti di filiera e di distretto	-	5,00	5,00
			B.	Diversificazione dell'economia rurale e accorpamento fondiario	-	5,00	5,00
4	Azioni orizzontali	25,00	A.	Comunicazione e informazione	2,00	3,00	5,00
			B.	Ricerca e sperimentazione	5.00	15.00	20,00
5	Monitoraggio e rete laboratori	10,00	A.	Potenziamento rete laboratori pubblici	2,00	3,00	5,00
			B.	Monitoraggio e diagnostica	2,00	3,00	5,00
	TOTALE AZIONI	300,00		TOTALE MISURE	150,00	150,00	300,00

Tabella 6.1: Suddivisione delle risorse tra le annualità 2020-2021. Fonte: *Stralcio del D.L. 27/2019, art.2*

Purtroppo ad oggi, dopo circa 21 mesi dal momento in cui tali fondi avrebbero dovuto essere stanziati, aleggia preoccupazione tra gli agricoltori. Infatti come

denuncia il Consorzio Olivicolo Italiano Unaprol sono circa la metà del totale i fondi non ancora utilizzati, pari a 134 milioni: sono state impiegate le risorse "destinate alle calamità, mentre sono rimasti inattuati gli interventi che avrebbero dovuto consentire agli agricoltori di ricominciare a lavorare e a produrre".

6.1 Sovrainnesto

Una delle prime proposte di riconversione è nata dal desiderio, forse un po' presuntuoso e al tempo stesso ambizioso, di salvare il patrimonio identitario della Regione Puglia e consiste nel sovrainnesto, tecnica che si pensava potesse creare barriere naturali in grado di ostacolare la diffusione del patogeno.

L'agronomo, olivicoltore, frantoiano e presidente del consorzio Dop "Terra d'Otranto", Giovanni Melcarne, studiando dei precedenti casi di letteratura in cui erano stati individuati storici esempi di successo di resistenze genetiche a batteri causa di epidemie, ha pensato di sfruttare le varietà di olivo che avevano mostrato una minore suscettibilità al patogeno, quali tra tutti il Leccino e la Fs-17, nota anche come Favolosa. E in particolare, la tolleranza al batterio presentata dal Leccino è risultata essere particolarmente significativa, essendo essa la terza varietà, in termini di abbondanza, coltivata in Salento.

Pertanto, Melcarne ha proceduto, nel 2017, al lancio del progetto "Xylella quick tolerance test", che prevede il sovrainnesto di materiale vegetale, prelevato da zone indenni, su piante già colpite dalla malattia. Sono stati innestati in totale 1000 olivi con 250 varietà differenti (220 italiane, tra cui 70 già presenti in Puglia), distribuiti su un'area di circa 12.2 ettari, nel Comune di Presicce (LE), che è diventato il più grande campo sperimentale nell'ambito dell'emergenza Xylella (Figura 6.1).

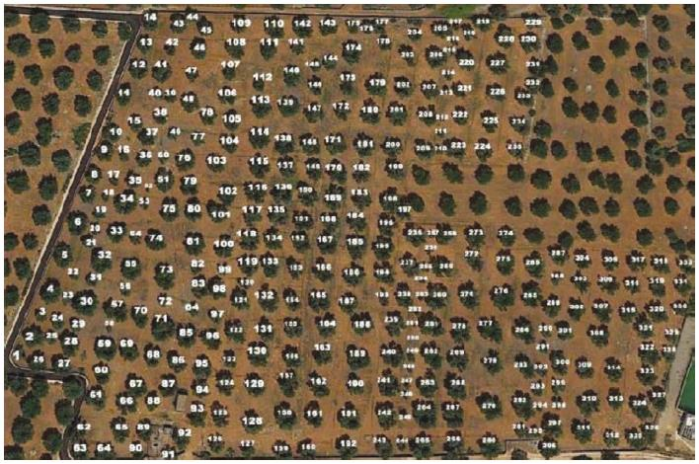


Figura 6.1: Veduta satellitare del campo sperimentale di Presicce e codice numerico identificativo per le piante del disegno sperimentale a blocchi randomizzati. Fonte: Olivo e Olio, p. 4 Aprile 2017

Ciascun innesto è stato analizzato dai ricercatori del Cnr di Bari, mediante analisi molecolari di tipo quantitativo, per capire quale varietà fosse risultata più tollerante alla Xylella fastidiosa. Ogni varietà è stata innestata su 5 piante differenti e per ogni albero sono stati eseguiti 4-5 innesti, adoperando la tecnica del cosiddetto "innesto a pezza" (o a tassello), che consiste nell'eseguire un taglio di forma quadrata in corrispondenza del portainnesto in cui viene inserita la "pezza", contenente una gemma, in maniera tale da far coincidere perfettamente i due tagli. (Figura 6.2).

Figura 6.2: Innesto a pezza. Fonte: *Olivo e Olio, p. 4 Aprile 2017*

Per poter ottenere risultati ottimali in termini economici, temporali e produttivi, è stato adottato in via del tutto sperimentale, nello stesso campo di Presicce, l'"innesto a marze", che ha tentato, con discreto successo, di soppiantare la tecnica a pezza, efficace ma anche molto onerosa. L'innesto a marze, generalmente usato per alberi da frutto, permette di unire due piante mediante l'utilizzo di un rametto (nesto) che contiene una o più gemme da "impiantare" nella pianta forte e robusta (non in termini di "esenzione" dalla malattia) che funge da portainnesto (Figura 6.3).

Figura 6.3: Innesto a marze. Fonte: *Teatro Naturale (rivista online), Luglio 2017*

Il nome del progetto è "Quick test" poiché l'innesto è stato eseguito al piede della piata infetta in maniera tale da garantire un trasferimento veloce del batterio alla specie meno suscettibile; con il passare del tempo gli xilemi danneggiati verranno sostituti da nuovi xilemi tolleranti e resistenti riducendo così la carica batterica nell'olivo e la capacità di trasmissione dello stesso in aree ancora indenni.

Tuttavia questa soluzione ha, sin da subito, dovuto fare i conti con alcuni disclaimers, quali ad esempio il fatto che nonostante l'innesto la pianta rimanga comunque malata o che si perdano "varietà e qualità", come hanno fatto presente

molti agricoltori, o ancora che tali tecniche, essendo molto costose, avrebbero dovuto ricevere, sin dal primo momento, un sussidio statale.

A contribuire alla bocciatura, per lo meno nella zona del leccese, di questa soluzione è stato il fatto che, a distanza di 4 anni dalla realizzazione del campo sperimentale di Presicce, nessuna delle 1000 piante innestate è sopravvissuta, probabilmente a causa del fatto che la malattia si trovava in uno stato già avanzato tale da compromettere la riuscita dell'intervento.

Difatti, in zone meno colpite, quale quella della Piana degli ulivi monumentali, tra il brindisino e il barese, la tecnica dell'innesto potrebbe (il condizionale naturalmente è d'obbligo) risultare quantomeno utile per tamponare il dilagare dell'epidemia. Ed è per questo motivo che tra i fondi messi a disposizione dalla Regione Puglia, vi sono 5 milioni destinati alla "salvaguardia degli olivi secolari e monumentali" (Tabella 6.1). Melcarne, infatti, non ha si è dato per vinto: ad oggi collabora con il CNR di Bari nella sperimentazione di innesti di piante altamente suscettibili con varietà resistenti e nella ricerca di semenzali e piante spontanee resistenti. È bene sottolineare che comunque la strategia è esclusivamente di tipo preventivo e l'auspicio è quello di agire tempestivamente, affinché il sovrainnesto con cultivar di olivo resistenti, quali il Leccino e la Fs-17, possa dare i suoi "frutti", aumentando le chances di sopravvivenza di olivi ancora sani appartenenti a varietà suscettibili.

6.2 Installazione di impianti fotovoltaici

A seguito o, per meglio dire, in concomitanza al tramonto della soluzione sopra esplicata, ne è stata prospettata ed adottata una seconda, aspramente criticata. Si tratta dell'utilizzo di vaste aree agricole ormai "dismesse" come base per l'impianto di parchi fotovoltaici e, in minor parte, eolici.

Stando ai rapporti Ispra relativi al consumo del suolo, negli ultimi anni, a partire dal 2016, la Puglia è stata una tra le regioni italiane che maggiormente ha

consumato in termini di superficie. E se analizziamo meglio la situazione a livello locale, la provincia di Lecce è quella che ha riportato i numeri più alti tra le 6 province pugliesi: nel solo 2020 è stato registrato un consumo di suolo pari a 40.000 ettari (493 ettari persi a causa della cementificazione, dell'abbandono e degli impianti fotovoltaici), con una significativa crescita di nuovo suolo artificiale (circa 150 ettari), quello che Antonio Cederna, uno dei padri dell'ambientalismo, ha definito "crosta repellente di cemento e asfalto".

In particolare, tra il 2019 e il 2020, l'installazione di parchi fotovoltaici a terra ha assorbito 66 ettari, corrispondenti circa al 37% del suolo pugliese consumato (Fonte*: Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2021, Ispra*), dato secondo solo a quello della Sardegna, che visto una perdita, nell'ultimo anno, di 105 ettari (circa il 58% del totale).

Figura 6.4: Impianti fotovoltaici installati su oliveti colpiti da Xylella (Copertino, Lecce)

Savino Muraglia, presidente di Coldiretti Puglia, denunciando i più di 157 mila ettari di suolo persi a causa dei parchi rinnovabili (uno dei dati più negativi di Italia), si è unito all'appello di Ettore Prandini, presidente italiano di Coldiretti, avviando una battaglia nazionale che pone il veto sullo sfruttamento di suolo

agricolo per pannelli solari e/o fotovoltaici. E' stato fatto un appello alla Regione Puglia, il cui quadro normativo a riguardo si è rilevato poco efficace o in attesa di attuazione/definizione, affinché legiferi in materia ponendo un freno all'impianto selvaggio e destinando luoghi "idonei" (non si intende discutere certo l'utilità di tali installazioni in merito alla produzione di energia green), quali aree industriali dismesse, pari a circa 9 mila chilometri quadrati sull'intero territorio nazionale, e tetti di abitazioni e capannoni industriali, al fine di preservare i terreni agricoli ed evitare lo stravolgimento del paesaggio.

Ad onor del vero, c'è comunque da tener presente che il consumo di suolo, che nel 2020 è cresciuto nella Penisola a ritmo di quasi due metri al secondo, non è solo imputabile alla realizzazione dei parchi rinnovabili. Anche gli incendi, infatti, che si sono avuti tra i comuni di Brindisi e Lecce (molti dei quali causati proprio dalla stessa epidemia, come è stato già sottolineato in precedenza) hanno contribuito ad una significativa perdita (circa 80 ettari di suolo nel 2020), così come la visibile riduzione della linea costiera, che si fa sentire ogni anno in maniera sempre più prepotente sulle spiagge italiane (e, in particolare, salentine, sarde e siciliane), come conseguenza inevitabile del cambio climatico e della, forse più evitabile, speculazione edilizia.

6.3 Espianto e reimpianto di olivi

La terza ipotesi, di seguito illustrata, di "riconversione" ha ben poco, trattandosi dell'espianto e reimpianto di olivi, tenendo conto di quelle che sono le cultivar olivo resistenti all'epidemia Xylella.

Sono diversi gli agricoltori che in provincia di Lecce, tra il 2018 e il 2019, accedendo ai fondi stanziati dal precedente bando, hanno potuto estirpare e reimpiantare piante di Leccino (Figura 6.5) e Favolosa (Figura 6.6) che, per il momento, non risultano essere in alcun modo intaccate dal virus. C'è dunque la volontà e la speranza di poter ricostruire un paesaggio che affonda le sue radici in una storia millenaria: si va avanti nell'attesa di poter raccogliere nei prossimi

anni il frutto della fiducia che gli agricoltori hanno riposto in queste nuove "vite".

Figura 6.5: Reimpianto di olivi, varietà Leccino (Presicce, Lecce)

Figura 6.6: Reimpianto di olivi, varietà Fs-17 "Favolosa" (Presicce, Lecce)

Il Piano 2020-2021 ha previsto lo stanziamento di 40 milioni di euro in totale (Tabella 6.1). Questi fondi hanno lasciato molta delusione e amarezza tra gli

agricoltori: difatti solo una piccolissima parte di tutte le istanze, pari al 6%, è stata accolta. Sono stati finanziati solo 521 domande e 23 progetti collettivi a causa dell'esiguità delle risorse che, se avessero voluto soddisfare in toto la richiesta, avrebbero dovuto essere pari a 216 milioni di euro. D'altra parte, invece, c'è poi la spesa relativa alla misura salva frantoi che ammonta a 6 milioni di euro, a fronte di una disponibilità totale pari a 35 milioni, a causa dei requisiti di accesso che non consentono alle strutture dismesse, vendute all'estero, di poter ripartire.

6.4 Diversificazione colturale

Un'ultima possibilità che si sta facendo strada negli ultimi anni, nasce dall'evidenza pratica che ha visto, in questi ultimi 10 anni, interi terreni popolati da migliaia di ulivi secchi (ancora da eradicare) affiancati da (pochi) alberi da frutto, quali agrumi, mandorli, peschi albicocchi, fichi, che si sono dimostrate resistenti o immuni all'organismo patogeno. (Figura 6.7)

Figura 6.7: Alberi di olivo colpiti da Xylella e alberi da frutto resistenti al batterio (Ortelle, Lecce)

Da qui, la proposta di eliminare definitivamente gli alberi di olivo e puntare su una diversificazione colturale, in maniera tale da evitare, che, in un futuro (si spera remoto), un'eventuale pandemia possa azzerare il patrimonio produttivo del territorio, come avvenuto con la Xylella.

A farla da padrone in questa proposta sarebbero le piante di ciliegio dolce e mandorlo, che sono state esposte, nei laboratori del Cnr di Bari, sia all'inoculo artificiale sia ad adulti di Sputacchina media, portatori del batterio; ciò che è emerso è che questi alberi hanno una presenza media del batterio pari all'11%, contro il 74.43% che è stato individuato negli ulivi.

A seguito di tali risultati, Coldiretti Lecce, nella persona del presidente Cantele, ha chiesto che nel programma del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) fossero inserite misure per permettere di perseguire la strada della consociazione dell'avicoltura con l'orticoltura, per garantire "il ripristino e la nuova creazione di riforestazione al servizio degli operatori e dell'indotto turistico sull'area infetta". Pertanto, all'interno del D.M. 11/06/2020, è stata prevista una somma destinata alla diversificazione: dei 300 milioni stanziati, tra il 2020 e il 2021, 25 milioni sono stati messi a disposizione per l'impianto di nuove colture nelle zone che sono risultate infette dal batterio in un quadro di re-valorizzazione economica e paesaggistica (Tabella 6.1).

Tuttavia, se in un primo momento era stata approvato l'articolo 26 della legge 52/2019 della Regione Puglia, che consentiva "l'impianto di qualsiasi essenza arborea in deroga ai vincoli paesaggistico culturali al fine di garantire la biodiversità agricola e la resistenza dell'ecosistema alle mutazioni o ricombinazioni del batterio Xylella", il 21 aprile 2021, con la sentenza 74/2021, pubblicata sulla Gazzetta ufficiale n. 1° Serie speciale – Corte costituzionale n. 16, la Corte di Giustizia ha abrogato tale concessione, riconoscendo che la 52/2019 "eccedeva i limiti regolarmente imposti alle Regioni in materia di beni culturali".

Grazie, però, all'impegno profuso dall'Assessore all'Agricoltura della Regione Puglia, Donato Pentassuglia, e al supporto scientifico offerto dai ricercatori dell'Osservatorio fitosanitario regionale e dell'Istituto per la protezione sostenibile delle piante, a seguito di una riunione presso il Ministero delle Politiche Agricole, tenutasi in data 03.05.2021, è stata nuovamente data la concessione per l'impianto di agrumeti e altri alberi da frutto nelle aree classificate come infette.

Ed è stato il Dajs, nella figura del presidente Pantaleo Piccinno, a prendere in mano la situazione, appoggiato dall'autorità provinciali competenti, convocando una prima riunione con tutti i sindaci della provincia di Lecce, in data 23.08.2021, al fine di illustrare loro progetti di rigenerazione sostenibile e di riforestazione. "Sappiamo che la monocultura dell'ulivo non è più riproponibile" – ha detto Piccinno, in questa sede, - "Dobbiamo pensare insieme un futuro". E la risposta non ha tardato ad arrivare. A fine settembre erano già 300 gli ettari ad essere stati messi a disposizione del Dajs, pronti subito a diventare boschi, offerti da imprese e cittadini.

Il progetto, coordinato dal Dajs e sostenuto dall' Università del Salento, Istituto Agronomico del Mediterraneo, Centro europeo Mediterraneo sui cambiamenti climatici, Cnr, Università di Bari e Politecnico di Bari, avrà come obiettivo non solo quello di recuperare un territorio martoriato, in cui la Xylella ha cancellato milioni di ulivi, sinonimo di economia, bellezza ed identità, ma anche quello di realizzare, impiegando il potenziale di stoccaggio ed assorbimento della CO2, la *carbon neutrality* di distretto, programma compreso nel Piano di Rigenerazione del Salento che risulterebbe essere "sistema pioneristico per la vastità dell'area interessata e per la complessità dell'operazione ambientale".

Ad oggi (novembre 2021), il progetto di riforestazione non è ancora partito, ma l'avvio si prospetta in tempi molto brevi.

7. Conclusione e Sviluppi futuri

Allo stato delle attività in essere per combattere la malattia, vi sono da segnalare tre progetti (di cui uno in corso) finanziati dalla comunità europea (Pon-TE, XF-ACTORS e Redox), del quale si è parlato nel Paragrafo 3.3, i quali prevedono, tra l'altro, l'impiego di sensori iperspettrali e termici.

Con il presente lavoro si è deciso di valutare la possibilità di giungere a risultati similari, in termini di monitoraggio della malattia nei primissimi stadi, mediante impiego di strumentazioni "più povere" e sulla base di un'analisi computazionale eseguita in funzione degli Indici Vegetazionali.

Gli obiettivi preposti erano sostanzialmente due, ovvero la quantificazione dei danni causati dall'epidemia Xylella e il monitoraggio finalizzato all'individuazione di piante malate non sintomatiche e/o nei primissimi stadi, mediante l'impiego di sensori multispettrali montati su aerei (primo campione di dati) o UAV (secondo campione di dati).

Nella prima parte del lavoro è stato eseguito un confronto multitemporale sulle immagini aeree fornite dalla CGR, acquisite in due periodi (2016-2019) in cui lo stato di salute delle piante era completamente differente in termini di massa fogliare secca. È stato possibile raggiungere l'obiettivo di quantificazione del danno mediante il calcolo, in termini percentuali, della diminuzione fogliare sulla base di 4 indici vegetazionali (GNDVI, BNDVI, OSAVI, ARVI). I risultatati ottenuti, oltre ad essere coerenti tra di loro, hanno soddisfatto quelli che erano i risultati attesi e hanno trovato conferma nella documentazione fotografica riportata. A tal riguardo, si precisa che è stato possibile supportare i risultati ottenuti, relativi al 2019, con le immagini acquisite in campo nel 2021, in quanto non è stato eseguito alcun trattamento fitosanitario (né precedente né successivo al momento delle acquisizioni aeree).

La seconda parte dell'analisi ha previsto l'acquisizione diretta del campione di dati mediante dei rilievi eseguiti in campo impiegando il sistema UAV ad alta precisione, Phantom 4 Multispectral, dotato di un sensore multispettrale. In questo secondo caso sono state analizzate le immagini per individuare, sempre in funzione di indici vegetazionali, dei valori soglia che permettessero di individuare delle anomalie riconducibili ad effetti della Xylella sulla pianta, assumendo come riferimenti l'oliveto sano dell'AOI3 (Fasano) e quello malato dell'AOI6 (San Pietro Vernotico).

Si precisa che in nessuno dei due appezzamenti si è a conoscenza di analisi di laboratorio in base alle quali è possibile attestare la presenza o meno della malattia, tuttavia sono stati assunti questi riferimenti per i motivi appresso indicati:

- nell'area di Fasano, zona Torre Spaccata (AOI3) non è stato individuato alcun ramoscello disseccato e la raccolta delle olive non ha subito alcun tipo di inflessione legata alla Xylella;
- nell'area di San Pietro Vernotico (AOI6), che rientra tra le "zone infette" stabilite dalla Regione Puglia, gli alberi mostrano disseccamento evidente. Il periodo storico e la zona in cui si trovano lascia pensare che il motivo sia rintracciabile nella Xylella.

In questa seconda analisi tra i quattro IV valutati solo due (GNDVI, BNDVI) hanno dato delle risposte coerenti tra di loro e rispondenti allo stato rilevato. Sulla base dei suddetti IV, avendo fissato dei valori soglia per discriminare la chioma sana da quella malata, è stato possibile individuare delle "anomalie" nella chioma di alcuni olivi dell'AOI4 (Fasano) e dell'AOI5 (Ostuni) che ad occhio nudo non presentavano un'evidente sintomatologia.

La validità dell'approccio è stata confermata dai risultati delle analisi di laboratorio, rese note in data 4 novembre 2021. Gli olivi che, a seguito di analisi

computazionale, eseguita in funzione degli IV considerati e delle soglie poste, avevano presentato delle anomalie sono risultati effettivamente malati.

In aggiunta a questo inamovibile ed importante riscontro, se ne può considerare un secondo che avvalora ulteriormente il presente lavoro. Gli IV che sono stati selezionati come i migliori, in termini di individuazione di anomalie riconducibili al batterio Xylella fastidiosa, sono stati il BNDVI e il GNDVI, in cui la banda dell'infrarosso vicino (NIR) è normalizzata rispetto al blu (BNDVI) e al verde (GNDVI).

Questo risultato trova conferma in uno dei più recenti studi in merito, *Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species*, (Ottobre 2021), il quale ha dimostrato che le regioni dello spettro elettromagnetico più sensibili all'infezione da Xylella negli alberi d'olivo, nello stadio pre-sintomatico, sono quella del blu (NPQI) e del verde (PRI).

Dunque, alla luce delle analisi computazionali condotte, dei risultati conseguiti e dei riscontri ottenuti si può, **senza dubbio**, **confermare la validità dell'approccio computazionale attraverso il calcolo degli Indici Vegetazionali, GNDVI e BNDVI, mediante impiego di sensori multispettrali** ai fini del monitoraggio degli effetti della malattia sin dallo stadio pre-sintomatico/iniziale.

In definitiva**, i rilievi eseguiti con sensori multispettrali sono risultati essere un valido strumento per valutazioni speditive che individuino, in una fase di screening preliminare, "anomalie" da sottoporre ad indagini più approfondite.**

Per validare definitivamente e su larga scala il metodo computazionale con sensori multispettrali, si potrebbe pensare ad un'estensione dell'applicazione tanto in termini temporali quanto in termini spaziali.

Uno sviluppo del presente lavoro potrebbero infatti essere dei confronti multitemporali sulle aree già analizzate volte al monitoraggio degli effetti della malattia (similmente a quanto fatto con il primo campione di dati) o all'individuazione di nuovi focolai. Tale monitoraggio potrebbe essere fatto implementando un algoritmo di segmentazione in funzione dei valori soglia degli IV definiti nel presente lavoro, al fine di identificare sulle chiome delle anomalie, riconducibili ad una potenziale infezione da Xylella fastidiosa.

In alternativa a questo, o in aggiunta qualora lo si volesse, si potrebbe pensare ad estendere il raggio di azione (sia in termini geografici sia, in senso lato, in termini di colture differenti) ed implementare nuovi IV. A questo proposito, e solo a titolo esemplificativo, una coltura che richiederebbe un monitoraggio immediato e speditivo è quella dei gerani, l'ultima specie ad essere inserita nel registro piante ospiti di Xylella dalla Comunità Europea il 29 settembre 2021.

In aggiunta a questo, ad integrazione, supporto e potenziamento di quanto svolto, tenuto conto dello stato dell'arte e dei progetti (conclusi, in corso e in via di definizione) in cui tale lavoro si inserisce, si potrebbe pensare all'impiego del medesimo approccio computazionale per immagini acquisite con sensori iperspettrali. Tali strumenti hanno una risoluzione spettrale di gran lunga superiore a quella di un sensore multispettrale, essendo in grado di acquisire più di cento bande di radiazione elettromagnetica alla volta; pertanto i risultati forniti sono più raffinati, fermo restando il "costo" di una più complessa elaborazione, sia in termini sia in termini economici (per via della strumentazione necessaria) che di tempo-lavoro (per via della mole di dati rilevati).

Non avendo ancora ancora una terapia certificata contro la Xylella, è necessario ed opportuno che l'intera comunità si concentri nel prossimo futuro su acquisizioni con UAV attrezzati con sensori di vario tipo, unico strumento che consente di monitorare il progredire della malattia, in attesa di individuare una cura idonea che ostacoli l'avanzare della stessa evitando eradicazioni indiscriminate con denaturalizzazione del paesaggio.

8. Bibliografia

N. Broge, E. Leblanc, 2000. Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area and Canopy Chlorophyll Density. *Remote Sensing of Environment 76*, 156-172.

D. Haboudane, et al, 2004. Hyperspectral Vegetation Indices and Novel Algorithms for Predicting Green LAI of Crop Canopies: Modeling and Validation in the Context of Precision Agriculture. *Remote Sensing of Environment 90*, 337-352.

F. Nigro, D. Boscia, I. Antelmi, A. Ippolito, 2013. *Fungal species associated with a severe decline of olive in Southern Italy*

M. Saponari, D. Boscia, F. Nigro, G.P. Martelli, 2013. *Identification of DNA sequences related to Xylella fastidiosa in oleander, almond and olive trees exhibiting of a scorch symptoms in Apulia (Southern Italy)*

J. Peñuelas, G. Marino, J. Lusia, C. Morfopoulos, G.Farré-Armengol, I.Filella, 2018. *Photochemical reflectance index as an indirect estimator of foliar isoprenoid emissions at the ecosystem level*

S. Gaulano, E. Tarantino, F. Santoro, F. Valentini, N. Dongiovanni, A.M. D'Onghia, 2014. *Analisi assistita da immagini aeree ad elevata risoluzione geometrica per il riconoscimento del Complesso del Disseccamento Rapido dell'Olivo associato al batterio Xylella fastidiosa in Puglia*

R. M. Haelterman, P. A. Tolocka, M. E. Roca, F. A. Guzman, F. D. Fernandez, M. L. Otero, 2015. *First presumptive diagnosis of Xylella fastidiosa causing olive scorch in Argentina*

A. Giampetruzzi, M. Morelli, M. Saponari, G. Loconsole, M. Chiumenti, D. Boscia, V. N. Savino, G. P. Martelli, P. Saldarelli, 2016. *Transcription profiling of two olive cultivars in response to infection by the CoDIRO strain of Xylella fastidiosa subspecie pauca*

D. Boscia, G. Altamura, M. Saponari, D. Tavano, S. Zicca, P. Pollastro, M.R. Silletti, V.N. Savino, G.P. Martelli, A. Delle Donne, S. Mazzotta, P.P. Signore, M. Troisi, P. Drazza, P. Conte, V. D'Ostuni, S. Merico, G. Perrone, F. Specchia, A. Stanca, M. Tanieli, 2017. *Incidenza di Xylella in oliveti con disseccamento rapido*

G. Strona, C. J. Corrie Jacobien Carstens, P. S. A. Beck, 2017. *Network analysis reveals why Xylella fastidiosa will persist in Europe*

M. Saponari, D. Boscia, G. Altamura, G. Loconsole, S. Zicca, G. D'Attoma, M. Morelli, F. Palmisano, A. Saponari, D. Tavano, V. N. Savino, C. Dongiovanni, G.P. Martelli, 2017. *Isolation and pathogenicity of Xylella fastidiosa associated to the olive quick decline syndrome in southern Italy*

P. J. Zarco-Tejada, C. Camino, P. S. A. Beck, R. Calderon, A. Horner, R. Hernández-Clemente, T. Kattenborn, M. Montes-Borrego, L. Susca, M. Morelli, V. Gonzalez-Dugo, P. R. J. North, B. B. Landa, D. Boscia, M. Saponari, J. A Navas-Cortes, 2018. *Previsual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations*

K. Schneider, W. van der Werf, M. Cendoya, M. Mourits, J. A. Navas-Cortés, A. Vicent, A. Oude Lansink, 2020. *Impact of Xylella fastidiosa subspecies pauca in European olives*

A. Hornero, R. Hernandez-Clemente, P.R.J. North, P.S.A. Beck, D. Boscia, J.A. Navas-Cortes, P.J. Zarco-Tejeda, 2020. *Monitoring the incidence of Xylella fastidiosa infection in olive orchards using ground-based evaluations, airborne*

imaging spectroscopy and Sentil-2 time series through 3-D radiative transfer modelling

N. Bodino, V. Cavalieri, C. Dongiovanni, A. Simonetto, M.A. Saladini, E. Plazio, G. Gilioli. G. Molinatto, M. Saponari, D. Bosco, 2020. *Dispersal of Philaenus spumarius (Hemiptera: Aphroridae), a Vector of Xylella fastidiosa, in Olive Grove and Meadow Agroecosystems.*

P. J. Zarco-Tejada, T. Poblete, C. Camino, V. Gonzalez-Dugo, R. Calderon, A. Hornero, R. Hernandez-Clemente, M. Romàn-Ecija, M. P. Velasco-Amo, B. B. Landa, P. S. Beck, M. Saponari, D. Boscia, J. A. Navas-Cortes, 2021. *Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species*

A. Fraschilla, 2021. Sole e altri abbagli*, L'Espresso, 36*, 48-53

M. Barba, 3 settembre 2021. Xylella fastidiosa: dalle origini ad oggi, Cosa resta degli olivi del Salento. *Radar Magazine,* www.radarmagazine.net

M. Tarantino, 12 settembre 2021. Rigenerazione post Xylella: c'è il "sì" dei sindaci al piano. *Il nuovo Quotidiano di Puglia, 251,* 9

E. Ratto, 23 settembre 2021. Sul Fronte della Xylella. *Rivista Studio,* http://www.rivistastudio.com/

M. Tarantino, 27 settembre 2021. Rimboschimento dopo la "strage": la mappa delle prime candidature. *Il nuovo Quotidiano di Puglia, 266* ,8,