

UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE

Sede di Piacenza

Dottorato di ricerca per il Sistema Agro-alimentare

Ciclo XXXIV

S.S.D. AGR/12

Un sistema di monitoraggio e di supporto alle decisioni per la gestione sostenibile dell'oliveto

Tesi di Dottorato di:

Andrea Anselmi

N. Matricola: 4814651

Anno Accademico 2020/2021

UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE

Sede di Piacenza

Dottorato di ricerca per il Sistema Agro-alimentare

Ciclo XXXIV

S.S.D AGR/12



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

Un sistema di monitoraggio e di supporto alle decisioni per la gestione sostenibile dell'oliveto

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Paolo Ajmone Marsan

Tutor:

Ch.mo Prof. Vittorio Rossi

Andrea Anselmi

N. Matricola: 4814651

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

CAPITOLO 1 - FINALITÀ E ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO	10
1.1 Parte introduttiva	10
1.2 Scopi del progetto di ricerca	12
1.3 Organizzazione delle attività di ricerca ed articolazione della Tesi	13
1.4 Bibliografia.....	14
CAPITOLO 2 - L'OLIVICOLTURA ITALIANA	15
2.1 Cenni sull'olivo	15
2.2 La produzione olivicola italiana	16
2.3 Peculiarità dell'olio d'oliva italiano	17
2.4 Criticità dell'olivicoltura italiana.....	17
2.4.1 Difficoltà fitosanitarie	19
2.4.2 Considerazioni conclusive relative alle criticità di settore	19
2.5 Strategia future	20
2.5 Bibliografia.....	22
CAPITOLO 3 - AVVERSITÀ E STRATEGIE DI DIFESA DELL'OLIVO.....	24
3.1 Quadro generale.....	24
3.2 Antracnosi dell'olivo	28
3.2.1 Agente causale: <i>Colletotrichum</i> spp.....	28
3.2.1 Epidemiologia e fattori predisponenti	30
3.2.2 Quadro sintomatologico e danni	34
3.2.3 Strategia di difesa e gestione del patogeno	35
3.3 Occhio di pavone	38
3.3.1 Agente causale: <i>Venturia oleaginea</i> (Castagne) Rossman & Crous.....	38

3.3.2	Epidemiologia e fattori predisponenti	39
3.3.3	Quadro sintomatologico e danni	45
3.3.4	Strategia di Difesa e gestione del patogeno	47
3.4	Complesso del Disseccamento Rapido dell'Olivo (CoDiRO).....	50
3.4.2	Agente causale e danni	50
3.4.3	Sintomatologia ed epidemiologia.....	53
3.4.4	<i>Philaenus spumarius</i> , vettore della <i>Xylella fastidiosa</i>	53
3.4.4	Strategie di difesa: controllo di <i>Xylella fastidiosa</i> e del vettore <i>Philaenus spumarius</i>	56
3.5	Bibliografia.....	62
CAPITOLO 4 - SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI (DSS) IN AGRICOLTURA E DIFESA FITOSANITARIA		80
4.1	<i>Smart farming</i> e agricoltura digitale.....	80
4.2	Sistemi di Supporto alle Decisioni (<i>DSS</i>).....	82
4.2.1	Introduzione ai <i>DSS</i>	83
4.2.2	<i>DSS</i> in agricoltura.....	85
4.2.3	L'importanza del processo decisionale nella difesa fitosanitaria integrata e gli strumenti a supporto.....	90
4.2.4	<i>DSS</i> nelle strategie di difesa: stato dell'arte	95
4.3	Bibliografia.....	98
CAPITOLO 5 - UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLA GESTIONE DELL'OLIVETO: OLIVO.NET.....		104
5.1	Olivo.net: struttura e funzioni.....	105
5.1.1	Infrastruttura tecnologica	108
5.1.2	Moduli di olivo.net	110
5.1.3	Moduli per la gestione agronomica.....	112
5.1.4	Modelli previsionali integrati per la mosca dell'olivo.	114
5.1.5	Modello previsionale per <i>Venturia oleaginea</i>	117

5.2	Considerazioni sul sistema olivo.net: punti di forza e di debolezza.....	119
5.3	Bibliografia.....	121
CAPITOLO 6 - SVILUPPO DI UN MODELLO MECCANICISTICO PREVISIONALE GUIDATO DALLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE PER L'ANTRACNOSI DELL'OLIVO		
124		
5.1	Caratteri epidemiologici del patogeno.....	126
6.2	Obiettivi della ricerca	129
6.3	Materiali e metodi.....	129
6.3.1	Ricerca in letteratura	129
6.3.2	Analisi del sistema e sviluppo del modello	130
6.3.3	Convalida del modello	131
6.3.4	Caratteristiche degli oliveti e delle stazioni meteorologiche.....	132
6.3.5	Analisi dei dati	133
6.4	Risultati.....	134
6.4.1	Ricerca in letteratura	134
6.4.2	Analisi dei sistemi del ciclo di vita del complesso <i>C. acutatum</i>	134
6.4.3	Descrizione del modello.....	136
6.4.4	Validazione del modello.....	140
6.4.5	Esemplificazioni su tre serie di rilievi (Veg 17, Ave18, Nr19).....	143
6.5	Discussione.....	150
6.6	Conclusione	153
6.7	Bibliografia.....	154
CAPITOLO 7 – SVILUPPO E VALIDAZIONE DELLA FUNZIONE DI SPORULAZIONE DELL'OCCHIO DI PAVONE.....		
161		
6.1	Obiettivi della ricerca	163
7.2	Materiali e metodi.....	163
7.2.1	Ricerca in letteratura	163
7.2.2	Prova in campo.....	164

7.2.3	Sviluppo dell'equazione del tasso di sporulazione	170
7.2.4	Analisi Statistiche.....	171
7.3	Risultati.....	171
7.3.1	Ricerca in letteratura	171
7.3.2	Sviluppo dell'equazioni del tasso di sporulazione	172
7.3.3	Monitoraggio e dinamica della malattia.....	173
7.3.4	Validazione dell'equazione di sporulazione	180
7.4	Discussione e conclusioni.....	183
7.5	Bibliografia.....	183
CAPITOLO 8- REALIZZAZIONE DI UN MODELLO EMPIRICO DELLO SVILUPPO DI		
<i>Phylenus spumarius</i>.....		
187		
8.1	Introduzione.....	187
8.1.1	Ciclo biologico	187
8.1.2	I modelli previsionali applicati agli insetti.....	190
8.2	Obiettivi della ricerca	194
8.3	Materiali e metodi.....	196
8.3.1	Ricerca in letteratura	196
8.3.2	Monitoraggio e caratteristiche dei siti sperimentali	197
8.3.3	Dati meteorologici.....	200
8.3.4	Sviluppo del modello empirico basato sui gradi-giorno	200
8.4	Risultati e discussione	201
8.4.1	Ricerca bibliografica	201
8.4.2	Sviluppo del modello empirico basato sui gradi-giorno	202
8.5	Conclusioni.....	209
8.6	Bibliografia.....	209
CAPITOLO 9 – “TARATURA.SNAP”: UN APPLICATIVO PER LA REGOLAZIONE		
STRUMENTALE DELLE IRRORATRICI		
215		
9.1	Obiettivi della ricerca	216

9.2	Materiali e Metodi	217
9.2.1	Ricerca della letteratura di riferimento.....	217
9.2.2	Design e definizione dell'architettura dell'applicazione.....	218
9.2.3	Determinazione dei parametri d'esercizio.....	220
9.2.4	Individuazione delle condizioni dell'applicabilità del trattamento	224
9.2.5	Verifica del trattamento.....	226
9.2.6	Archivio.....	228
9.2.7	Help	228
9.3	Risultati.....	228
9.3.1	Volume di distribuzione	229
9.3.2	Regolazione dello spray	235
9.3.3	Applicabilità del trattamento	237
9.3.4	Verifica del trattamento.....	237
9.3.5	Archivio.....	241
9.4	Discussione e conclusioni.....	241
9.5	Bibliografia.....	244
Capitolo 10 - CONCLUSIONI.....		251
10.1	Modello meccanicistico previsionale per <i>Colletotricum</i> spp	252
10.2	Sviluppo di una funzione di sporulazione per <i>Venturia oleaginea</i>	254
10.3	Modello empirico basato sui gradi giorno dello sviluppo di <i>Philaenus spumarius</i>	255
10.4	App a supporto del processo di regolazione strumentale	257
10.5	Considerazioni conclusive.....	259
10.6	Bibliografia.....	261

CAPITOLO 1 - FINALITÀ E ORGANIZZAZIONE DEL LAVORO

1.1 Parte introduttiva

La Tesi affronta lo sviluppo progettuale di moduli integrativi per un sistema di supporto alle decisioni da utilizzare nella lotta integrata ad alcuni parassiti dell'olivo (*Olea europea* L.), una delle colture agrarie più importanti in Italia.

Dopo questo primo capitolo introduttivo, nel secondo verranno presentate le caratteristiche e le criticità dell'olivicoltura italiana, che fin dall'antichità è stata uno dei pilastri della nostra economia e della nostra cultura (Caracuta, 2020), che da qualche anno sta tuttavia trovando notevoli difficoltà colturali e commerciali. L'odierna produzione di olio di oliva in Italia non solo subisce la concorrenza delle produzioni provenienti dai mercati esteri, ma, per i cambiamenti climatici, si trova anche ad essere minacciata dall'aggravarsi degli attacchi da parte di alcuni parassiti, nonché dall'avvento di altri di nuova introduzione (Cola & Sarnari, 2020).

Negli ultimi decenni, infatti, come è avvenuto per molte altre colture, anche per l'olivo il cambiamento climatico sta fortemente peggiorando la dannosità di alcuni parassiti, ampliandone l'areale e provocando inquietanti recrudescenze, e favorendo la possibilità di arrivo e l'acclimatazione di organismi dannosi alieni.

Un sintetico quadro delle avversità dell'olivo verrà riportato nel capitolo tre di questa Tesi, capitolo che tuttavia è soprattutto rivolto ad approfondimenti sulle tre malattie della coltura che sono oggetto delle mie ricerche: l'antracnosi, l'occhio di pavone, e la batteriosi da *Xylella fastidiosa* Wells, comparsa recentemente.

In passato, la difesa fitosanitaria in olivicoltura ha visto sostanzialmente l'adozione di due principali condotte diametralmente opposte; da un lato, nelle realtà più grandi e strutturate, l'impiego massivo di formulati chimici, con evidenti problematiche socio-ambientali e dall'altro lato, nelle realtà più piccole, l'assenza di qualunque intervento, a discapito degli aspetti quali-quantitativi delle produzioni.

L'impiego di prodotti di difesa nelle realtà olivicole, sebbene non sia stato così intenso come per altre colture arboree, ha comunque suscitato timori per i rischi di impatto negativo sull'ambiente e sull'uomo.

D' altra parte è tutta la difesa fitosanitaria in agricoltura che ha subito nel suo complesso una profonda evoluzione.

La necessità di tutelare la salute umana e ambientale e di razionalizzare l'utilizzo delle risorse, portò alla nascita dell'Organizzazione Internazionale per il Controllo Biologico (IOBC), che nel 1959 coniò il termine di Controllo Integrato (Rossi et al., 2012), e verso la fine del XX secolo stimolò lo sviluppo della cosiddetta "agricoltura di precisione", o "agricoltura 3.0".

Più recentemente, la Commissione Europea, tramite la Direttiva 128/2009/EC, ha stabilito le norme per un uso sostenibile dei prodotti fitosanitari finalizzato alla riduzione dei rischi per la salute umana e per l'ambiente, definendo il termine "Difesa Integrata" e il suo obiettivo primario, ossia una produzione di colture sane con metodi che perturbino il meno possibile gli ecosistemi agricoli e che promuovano i meccanismi naturali di controllo fitosanitario (European Parliament, 2009; European Commission, 2009).

L'*Integrated Pest Management*, attuato in Italia con il Decreto legislativo del 14/08/2012 n° 150 (G.U. 30/08/2012), aveva come obiettivo quello di integrare e mettere a sistema tutte le possibili attività di riduzione delle popolazioni parassitarie e allorquando si renda necessario l'utilizzo di antiparassitari chimici, questo deve presentare una significativa sostenibilità economica e ambientale in modo da ridurre ogni rischio per la salute umana e per l'ambiente (EISA, 2001). Poiché gli attacchi parassitari, in scala spazio-temporale, differiscono notevolmente da un anno all'altro, la loro gestione integrata, da un punto di vista strategico, tattico ed operativo, risulta abbastanza complessa, e richiede profonde conoscenze e grandi capacità decisionali, da mettere in atto in svariati momenti temporali (Rabbinge et al., 1993). Si tratta sicuramente di una complessità superiore e di momenti decisivi più numerosi rispetto ad una difesa convenzionale (McCown, 2002).

In questo contesto, e come dettagliatamente illustrato nel capitolo quattro, la raccolta di dati e una loro opportuna elaborazione e analisi sono un valido strumento per orientare le decisioni operative nell'azienda, in particolare quelle della difesa fitosanitaria, in funzione della variabilità spaziale e temporale, portando ad un miglioramento dell'efficienza nell'uso delle risorse, della produttività, della qualità, della redditività e della sostenibilità della produzione agricola (Rossi et al., 2012). In questo capitolo, verranno spiegati i *DSS*, tecnologie di grande rilevanza nell'ambito dell'"agricoltura 4.0", o "*smart agriculture*" e che rappresentano oggi il sistema di gran lunga più efficace per rispondere alle prerogative di gestione integrata.

1.2 Scopi del progetto di ricerca

Il capitolo cinque è dedicato proprio all'illustrazione di un sistema di supporto alla gestione integrata dell'oliveto, denominato olivo.net, in cui io stesso ho collaborato nella fase preparatoria alle mie ricerche. Oltre a svariati moduli per la gestione agronomica degli impianti olivicoli, il sistema contempla anche modelli che permettono di decidere in tempo reale il momento più opportuno dei trattamenti contro due importanti parassiti dell'olivo e precisamente la mosca dell'olivo (*Bactrocera oleae* Rossi) (Anselmi et al., 2017) e l'occhio di pavone da *Venturia oleaginea* (Cast.) Hugh, sia pur quest'ultimo con stadi del ciclo ancora da esplorare.

Alla fine di questa attività è emersa l'esigenza di migliorare il sistema nel settore fitosanitario, con ricerche che colmassero taluni divari conoscitivi (es. su *V. oleaginea*) e che aiutassero a sviluppare modelli per la difesa contro altri importanti parassiti dell'olivo.

Sempre nel settore della difesa antiparassitaria di questa coltura, sono emerse inoltre pesanti criticità legate alla pratica applicazione dei trattamenti fitosanitari, oltre che per le grandi dimensioni delle piante e la difficile accessibilità che caratterizzano moltissimi oliveti, anche per la carente regolazione funzionale delle irroratrici e per il poco diffuso loro controllo strumentale.

Questi ultimi aspetti sono peraltro comuni a tutte le colture, quantunque le pratiche relative alla taratura, al controllo e alla manutenzione delle macchine irroratrici siano parte delle indicazioni contemplate dal Piano d' Azione Nazionale (PAN) adottato dal nostro Paese (Anselmi et al., 2017; Cola & Sarnari, 2020) in seguito alla suddetta Direttiva 128.

Sulla base di queste constatazioni, con le ricerche relative al mio Dottorato, la cui borsa è stata finanziata da Horta srl, nata come *spin off* dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza, ho voluto offrire contributi innovativi per colmare le criticità previsionali e di intervento nella lotta contro le tre più importanti malattie infettive dell'olivo, nonché per un miglioramento della distribuzione dei prodotti fitosanitari così come richiesto dalle recenti disposizioni legislative, In particolare, ad integrazione del *DSS* olivo.net, le finalità delle ricerche di questa mia Tesi di Dottorato sono state quelle di sviluppare dei moduli per una migliore difesa sostenibile dell'olivo, di cui:

- tre dedicati direttamente ad altrettanti importanti patogeni, e precisamente: *Colletotrichum* spp., agenti dell'antracnosi e *Venturia oleaginea*, agente dell'occhio di pavone, tra quelli fungini; *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* ST53, agente del cosiddetto "complesso del disseccamento rapido dell'olivo", tra i patogeni batterici. Riguardo a

quest'ultimo, per il quale non si conosce ancora una lotta efficace diretta al batterio, ci si è rivolti al controllo del suo principale vettore, *Philaenus spumarius* L. che, come si è visto, è il principale responsabile delle infezioni su piante sane e dell'espansione della malattia;

- il quarto, dedicato allo sviluppo di un'app per una corretta regolazione strumentale delle irroratrici e una più razionale esecuzione dei trattamenti antiparassitari, particolarmente importante per l'olivo verso cui, come abbiamo visto, la pratica esecuzione della difesa trova spesso notevoli difficoltà.

1.3 Organizzazione delle attività di ricerca ed articolazione della Tesi

Ad ognuno dei quattro studi sopra indicati è stato dedicato un capitolo della Tesi e precisamente:

- il capitolo 6 è stato dedicato allo sviluppo di un modello meccanicistico previsionale, guidato dalle condizioni atmosferiche per l'antracnosi dell'olivo;
- nel capitolo 7 è stata affrontata la sporulazione del patogeno *Venturia oleaginea*, agente dell'occhio di pavone;

il capitolo 8 è stato rivolto alla realizzazione di un modello empirico dello sviluppo di *Philaenus spumarius*, vettore di *Xylella fastidiosa*, agente del cosiddetto "complesso del disseccamento rapido dell'olivo";

- il capitolo nove è stato infine dedicato alla messa a punto di una app per la regolazione strumentale delle irroratrici.

Per ognuno dei tre patogeni considerati, attraverso una accurata analisi della letteratura, alla luce dei loro cicli e delle disposizioni fitosanitarie, si è cercato di verificare gli avanzamenti finora raggiunti nella difesa e focalizzare i contributi che possono servire agli scopi della Tesi. Sulla base delle evidenze emerse, si è cercato di pianificare nei dettagli i singoli programmi da portare avanti nel corso del Dottorato. In merito a detti patogeni, per non appesantire i tre specifici capitoli, molta parte riguardante gli approfondimenti sulla loro biologia, sui sintomi e danni indotti e sulla relativa lotta, preparatoria alle ricerche effettuate, è stata anticipata nel capitolo tre, dedicato alle avversità dell'olivo.

A livello di struttura dei capitoli, in ognuno verranno riportati le metodologie adottate, i risultati ottenuti e le considerazioni elaborate.

L'ultimo capitolo della tesi, il numero 10, è stato infine dedicato alle considerazioni finali sul lavoro svolto nel corso del mio progetto di Dottorato e sui possibili sviluppi delle attività.

1.4 Bibliografia

- Anselmi, A., Caruso, G., Cola, G., Gucci, R., Meriggi, P., Rossi, V., Sandali, P., Scaramozzino, N., & Servili, M. (2017). Un sistema di supporto alla gestione dell'oliveto. *Olivo e Olio*, 5, 28–32.
- Caracuta, V. (2020). Olive growing in Puglia (southeastern Italy): a review of the evidence from the Mesolithic to the Middle Ages. *Vegetation History and Archaeobotany*, 29(5), 595–620. <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00765-y>
- Cola, M., & Sarnari, S. (2020). *La competitività della filiera olivicola analisi della redditività e fattori determinanti*. Rete Rurale Nazionale - Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali. <https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/22376>
- EISA. (2001). *A Common Codex for Integrated Farming*. Sustainable Development. <http://ec.europa.eu/environment/archives/ppps/pdf/ilubrochure.pdf>
- European Commission. (2009). *Development of guidance for establishing Integrated Pest Management (IPM) principles* (Issue April).
- European Parliament. (2009). Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. *Official Journal of the European Union*, 309.
- McCown, R. L. (2002). Changing systems for supporting farmers' decisions: Problems, paradigms, and prospects. In *Agricultural Systems* (Vol. 74, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00026-4)
- Rabbinge, R., Rossing, W. A. H., & Van der Werf, W. (1993). Systems approaches in epidemiology and plant disease management. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 99(3 Supplement), 161–171. <https://doi.org/10.1007/BF03041406>
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038

CAPITOLO 2 - L'OLIVICOLTURA ITALIANA

2.1 Cenni sull'olivo

L'olivo (*Olea europaea* L.), pianta millenaria del paesaggio agricolo mediterraneo, ha un'origine che si colloca presumibilmente nel vicino Oriente, nella regione compresa tra i rilievi a sud del Caucaso e ad ovest dell'altopiano iraniano, dove, circa 6000 anni fa, il processo di domesticazione della specie *Olea Chrysophilla* Laxx. ha dato origine prima all'olivo selvatico (*Olea europaea* subsp. *oleaster* (Hoffmanns. & Link) Negodi) e successivamente all'olivo coltivato. Presto raggiunse il Mediterraneo, giungendo prima in Grecia, quindi sulle coste africane, infine, nella penisola iberica e italiana. Negli ultimi decenni l'olivo non è più solo una coltura mediterranea, perché è approdato e si è diffuso in numerosissimi altri Paesi, in particolare nel secondo dopoguerra, e come conseguenza dei flussi migratori, si è registrato un notevole aumento della coltivazione dell'olivo nelle Americhe (Argentina, Cile, Perù, Uruguay e USA) e in Australia (Bandino & Dettori, 2001; Vilar et al., 2018). Nel 2018 l'olivo veniva coltivato in 58 Paesi dei cinque continenti (Vilar et al., 2018).

In Italia l'olivicoltura ha rappresentato e rappresenta, senza ombra di dubbio, uno dei principali asset dell'agricoltura nazionale, questo a fronte anche del fatto della presenza millenaria di tale specie nel nostro territorio, che ha consentito la selezione e diffusione della più grande biodiversità genetica olivicola. Si tratta quindi di un settore estremamente vasto, con importanti risvolti nell'economia nazionale e con un preminente protagonismo non solo a livello europeo ma anche a livello mondiale. (Angelini et al., 2009)

Una grande tradizione e un grande settore economico che però sta attraversando ormai da qualche tempo difficoltà strutturali e commerciali, nonostante la qualità indiscutibile della produzione. L'odierna produzione di olio di oliva in Italia subisce la concorrenza delle produzioni di massa spagnole da un lato e dall'altro si trova ad essere minacciata per l'avvento di nuovi parassiti e per gli effetti dei cambiamenti climatici (Cola & Sarnari, 2020).

Con queste generalità introduttive, fatte le opportune segnalazioni sulla produzione olivicola italiana e sui relativi aspetti economici, verranno sottolineate le attuali gravi criticità del settore, compresi gli attacchi parassitari, e la necessità di un ammodernamento gestionale della coltura, sottolineando l'importanza in proposito delle nuove tecnologie, con particolare riferimento ai

sistemi di supporto alle decisioni da rivolgere proprio alla difesa fitosanitaria, il cui sviluppo progettuale, rappresenta l'oggetto di questa Tesi.

2.2 La produzione olivicola italiana

Fin dall'antichità l'olivicoltura è stata uno dei pilastri della cultura e dell'economia italiana (Caracuta, 2020), come testimoniato da numerosi ritrovamenti, alcuni dei quali risalenti già al X secolo a.C. (Tanasi et al., 2018). La diffusione dell'olivicoltura nella penisola, iniziata con i Greci, continuò successivamente ad opera di etruschi e romani. Nel V secolo a.C. l'olivicoltura era ampiamente diffusa in Sicilia, Toscana e Lazio dove si trovavano oliveti coltivati dagli etruschi (Caracuta, 2020) fino a trovare adozione in pressoché tutte le regioni, con una incidenza particolare in Liguria e nell'Italia centro meridionale. L'eccezionale gelata del 1929 determinò l'abbandono degli oliveti nell'Italia del Nord, con l'eccezione della Liguria, di alcune aree intorno al lago di Garda e sulle basse pendici sud dell'Emilia Romagna.

Per l'innalzamento della temperatura media annua determinata dai cambiamenti climatici, oggi l'olivo sta di nuovo diffondendosi in molte aree settentrionali, con presenza ormai in 18 regioni su 20 (raro solo in Valle d'Aosta e Alto Adige). Nelle aree padane gli impianti olivicoli stanno andando a rappresentare significative realtà in molte zone intorno a grandi laghi e sui bassi pendii, esposti prevalentemente a Sud, di Lombardia, Veneto, Piemonte, Trentino e Friuli.

Le Regioni più rilevanti per la produzione italiana si trovano tuttavia nel Sud della penisola, dove la Puglia da sola rappresenta il 51% della produzione nazionale, con una produzione di 193.000 tonnellate (2019), seguita dalla Calabria e dalla Sicilia, che contribuiscono rispettivamente per il 13% con una produzione di 40.000 tonnellate (2019) e per il 10% con 25.000 tonnellate (Cola & Sarnari, 2020; Wunsch, 2022).

Oggi nel nostro Paese vi sono più di un milione di ettari destinati all'olivicoltura (1.170.157 ha nel 2019), oltre l'8% della SAU nazionale, con oltre 825.000 aziende agricole, oltre 4000 frantoi attivi, circa 220 imprese industriali ed una produzione media intorno 400 mila tonnellate, seconda a livello mondiale.

Nell'ambito del bacino del Mediterraneo, dove si concentrano oltre i tre quarti della produzione mondiale di olive, l'Italia, insieme alla Spagna, alla Grecia e alla Tunisia, rappresenta uno dei principali attori di tale settore. La produzione olivicola italiana, infatti, incide mediamente per il 15% su quella mondiale e il settore si caratterizza per essere il primo importatore a livello mondiale e il secondo esportatore (dopo la Spagna) (Osservatorio Agroalimentare, 2021).

L'Italia ha anche il primato mondiale dei consumi di olio d'oliva, con circa 500 mila tonnellate annue ed è il secondo Paese dell'Unione Europea per esportazione di olio di oliva negli Stati extra UE, con ben 191.000 tonnellate (33%) nel 2018, preceduta solo dalla Spagna (301.400 t) e seguita da Portogallo (56.000 t) e Grecia (20.600 t) (European commission, 2021).

2.3 Peculiarità dell'olio d'oliva italiano

Una caratteristica peculiare che differenzia la produzione del settore olivicolo italiano da quella di altri Paesi è la qualità, aspetto testimoniato dalle 42 DOP e 6 IGP, circa la metà di quelle complessivamente registrate nell'Unione europea (Cola & Sarnari, 2020). Inoltre, le grandi potenzialità produttive dei nostri territori, l'importante patrimonio varietale che caratterizza le nostre coltivazioni, di oltre 500 cultivar, circa il 40% di quelle conosciute a livello mondiale, ci hanno garantito un'ottima esportazione del prodotto (Cola & Sarnari, 2020).

Tuttavia, pur accrescendo in maniera rilevante gli aspetti più propriamente qualitativi, la produzione di olivo italiano rispetto a quella mondiale è passato da un 34% dei primi anni Ottanta, a un 15% degli ultimi anni. Quest'ultimo dato rivela in maniera incontrovertibile la crisi che sta affrontando questo comparto nazionale, dettata da varie difficoltà strutturali e commerciali e riscontrabili principalmente proprio nel settore primario che analizzeremo nel paragrafo successivo

2.4 Criticità dell'olivicoltura italiana

Dal quadriennio 1998-2001 al 2015-2018 la produzione olivicola italiana, pur restando al secondo posto nel mondo, è calata del 46%; malgrado il mercato oleicolo sia stato in continua crescita e a fronte di una superficie sostanzialmente stabile, la produzione media italiana di olio d'oliva è scesa da 500 mila tonnellate ai primi del 2000, con annate vicine a 700 mila, a sotto i 400 mila (Andrioli, 2019), con 329 mila nel 2021 (Sarnari, 2022).

Così come la produzione, anche il consumo pro capite di olio di oliva in Italia segue una tendenza discendente nel lungo periodo: secondo i dati del bilancio di approvvigionamento nel 2020 esso sembrerebbe arrivato a 7,6 kg annui, dai circa 12 kg del 2012 (Cola & Sarnari, 2020). Indubbiamente l'Italia oggi soffre una forte competizione a livello internazionale, che tuttavia è per gran parte legata ad un' interna difficoltà nel processo produttivo, caratterizzato da una serie di difficoltà che non gli permette di produrre in maniera competitiva.

La principale criticità dell'olivicoltura italiana può essere infatti sinteticamente ascritta all'aumento considerevole dei costi di produzione degli ultimi anni, in concomitanza con la

crescita della competitività degli altri Paesi (Andrioli, 2019). Essa in realtà è frutto e figlia di numerose concause, tra le quali: annosità (61% della superficie olivicola con età superiore a 60 anni) e densità (49% degli oliveti con meno di 140 piante per ettaro) degli impianti; frammentazione della struttura produttiva (55% delle aziende inferiori ad un ettaro) e diffusione dell'olivicoltura in zone difficili (63% delle aziende olivicole in aree marginali); invecchiamento degli olivicoltori (oltre il 50% con un'età superiore a 65 anni); scarsa mobilità fondiaria; oscillazioni delle produzioni in termini qualitativi e quantitativi; presenza diffusa di un'olivicoltura non "imprenditoriale" ma sociale o condotta in modo non professionale, spesso hobbistica; difficoltà nell'ammodernamento degli impianti olivicoli esistenti; scarsa capacità di aggregazione; scarsa infrastrutturazione digitale; ritardo nel recepimento delle innovazioni tecnologiche e mancati investimenti; problematiche fitosanitarie (Cola & Sarnari, 2020).

Questa situazione è peraltro resa particolarmente complessa dalla diversa situazione nelle varie realtà territoriali. Proprio per questo non si può parlare dell'olivicoltura italiana ma delle olivicolture italiane, che danno vita a modelli produttivi diversi e differenti approcci al mercato. C'è un'olivicoltura più professionale, condotta in maniera imprenditoriale e rivolta al mercato e un'altra più hobbistica che per sua natura è maggiormente orientata all'autoconsumo o alla vendita diretta. Entrambe queste olivicolture, peraltro, rivestono una grande importanza rispetto a paesaggio e ambiente e sono caratterizzanti di molti territori italiani.

Nel complesso però esistono delle criticità che vanno ad interessare numerose o pressoché tutte le nostre regioni olivicole, come le coltivazioni in aree marginali, le aziende agricole di piccole dimensioni, l'annosità degli impianti, l'invecchiamento degli olivicoltori, le difficoltà nella difesa fitosanitaria, ecc.

Al contrario, l'olivicoltura spagnola è diventata particolarmente competitiva grazie all'ausilio dei piani quinquennali finanziati dalla Comunità Europea e alle scelte strategiche volte a introdurre nuovi modelli colturali (oliveti specializzati), una più spinta meccanizzazione delle principali operazioni agronomiche e nuove tecnologie volte a ridurre i costi di produzioni garantendo al contempo un incremento in termini quali-quantitativi della produzione. Dall'altro lato nuovi Paesi, quali Tunisia, Turchia, Americhe e Australia, hanno iniziato ad esportare olio di oliva "non di pregio" ma a prezzi nettamente più bassi.

In conclusione, l'Italia, mentre riesce a ben promuovere l'olio extravergine di maggiore qualità, nel prodotto di massa continua a subire la concorrenza straniera, proprio perché, nella filiera produttiva, il dominio di sistemi antiquati e poco redditizi vanno a mortificare l'entità e la sostenibilità delle produzioni, tanto che addirittura varie nostre frange olivicole vengono via via abbandonate o addirittura sostituite.

Uno dei punti più critici di detta filiera è sicuramente rappresentato dallo stato fitosanitario.

2.4.1 Difficoltà fitosanitarie

Lo stato sanitario dell'olivicoltura italiana è sicuramente peggiorato negli ultimi anni. Ciò è connesso a parassiti sia di nuova introduzione, sia endemici, che grazie ai cambiamenti climatici stanno estendendo il loro areale o inasprendo le loro dinamiche in aree in cui già sono conosciute. Tra queste, *in primis* la mosca olearia (*Bactrocera oleae* Rossi), un parassita coevoluto con l'olivo presente nell'intero range di diffusione della pianta, che però in Italia, nell'ultimo ventennio ha notevolmente aumentato la sua diffusione e attacchi, tali talvolta da compromettere intere produzioni. Nel 2014, ad esempio, in molti comprensori olivicoli, a causa di una serie concatenata di eventi meteo favorevoli, le popolazioni dell'insetto, a fronte di una difesa fitosanitaria distratta o incompleta, hanno provocato perdite della produzione olivicola anche del 100%. Problemi altrettanto gravi possono essere causati dall'antracnosi (*Colletotrichum* spp) oppure dall'occhio di pavone *Venturia oleaginea* (Castagne) Rossman & Crous. La più preoccupante minaccia all'olivicoltura italiana deriva tuttavia da un batterio di nuova introduzione, la famigerata *Xylella fastidiosa* Wells, un batterio poliospite che giunto accidentalmente in Salento, è riuscito a colonizzare *Olea europea*, veicolato dall'insetto *Philaenus spumarius* L., comunemente conosciuto come sputacchina, cancellando estese superfici olivicole della Puglia meridionale, con tendenza ad estendersi in sempre più estese superfici (EPPO, 2018; Vos et al., 2019).

Accanto a così gravi problematiche fitosanitarie in olivicoltura si uniscono le difficoltà nell'effettuare gli interventi di difesa, a causa delle grandi dimensioni delle piante e/o la scomodità di molti impianti, dove oltre a risultare notevolmente esosi, presentano gravi rischi per la salute e per l'ambiente.

2.4.2 Considerazioni conclusive relative alle criticità di settore

Se da un lato le caratteristiche di ogni segmento dell'olivicoltura italiana sono legate ad una identità locale, non si può disconoscere che l'olivo e l'olio hanno una esplicita connotazione nazionale: il *made in Italy*, la dieta mediterranea ha come epicentro l'olio di oliva. È proprio questa, quindi, la leva su cui puntare per rendere il settore sempre più competitivo a livello internazionale. A livello commerciale occorre intensificare ulteriormente la promozione all'estero del nostro olio e sul fronte interno necessita di una maggior informazione presso il consumatore finale.

Tuttavia, abbiamo visto che i punti di debolezza del settore si concentrano soprattutto nella fase agricola, particolarmente frammentata, povera di innovazioni, con oliveti che necessitano di essere rinnovati e con uno scarso ricambio generazionale anche per la poca appetibilità economica del settore.

I prossimi interventi nel settore dovranno quindi colmare questi aspetti negativi, a cominciare proprio dalle coltivazioni, soprattutto in termini di ammodernamenti e di investimento innovativo, che permettano al settore di tenersi maggiormente al passo con i tempi. L'importanza del ruolo dell'olivicoltura nel nostro Paese impone pertanto una profonda riflessione, cercando di valorizzare al massimo i suoi punti di forza e di mettere a punto le più idonee strategie per superare le sue tante debolezze, a partire proprio dalla filiera di campo e, *in primis*, dalla difesa fitosanitaria.

2.5 Strategia future

Il settore olivicolo-oleario è stato tra i primi ad aver beneficiato del sostegno della PAC, che in Italia si basa principalmente sui pagamenti disaccoppiati del primo pilastro a cui vengono associati pagamenti accoppiati volontari agli oliveti finalizzati a mantenere la produzione olivicola (Pupo D'Andrea, 2021)

Al momento, il processo di programmazione della PAC finalizzato a definire le future politiche agricole dal 2023 al 2027 a livello italiano è in corso; questo potrebbe essere il momento ideale per mettere nel giusto ordine i punti di forza e di debolezza del campo olivicolo e allo stesso tempo comporre una strategia complessiva per il settore nell'ottica di una sostenibilità globale: economica, ambientale e sociale.

Detta riforma potrebbe tradursi in una "Nuova OCM Olio" volta ad incidere direttamente sull'intera filiera, dagli oliveti alla trasformazione, con relativa promozione-commercializzazione secondo paradigmi di qualità e sostenibilità finalizzata alla sicurezza dell'ambiente e della salute dei cittadini. Il nuovo approccio "strategico", che include anche la valorizzazione del modello "*Farm to Fork*", vuole rispondere alla situazione di crisi del settore, per rilanciarlo nel medio-lungo periodo mediante l'attuazione di interventi e azioni (Sisti & Sarnari, 2020). Queste dovranno essere mirate alla riqualificazione della filiera olivicola-olearia con l'intento di far diventare l'olio di oliva un vero prodotto "culturale" che crei valore per i territori e benessere per la collettività. Tutto questo soprattutto senza perdere di vista quelli che sono gli obiettivi di sviluppo sostenibile del piano di azione di Agenda 2030.

Le suddette riforme e strategie operative potrebbero diventare una grossa opportunità per superare questa fase di stallo e di indecisione della nostra olivicoltura, purché prevedano interventi che vadano a migliorare tutta la filiera, con l'introduzione di sistemi avanzati di produzione sostenibile che traghettino il settore fuori dalle attuali problematiche strutturali e che ne permettano una rinnovata competitività (Pupo D'Andrea, 2021)

Nel rispetto di particolari aspetti paesaggistici, occorre in Italia una riconversione di una certa parte dell'olivicoltura, con nuovi sestri d'impianto più produttivi, una massimizzazione delle risorse, con nuovi sistemi colturali, nuove tecnologie di piantumazione e di raccolta con sistemi di guida automatica, nuove cultivar selezionate da un mondo della ricerca attivo e propositivo, ma anche una difesa fitosanitaria idonea ai tempi.

Nel contesto olivicolo nazionale, caratterizzato da realtà produttive anche molto differenziate a seconda dell'area geografica, risulterà tuttavia fondamentale promuovere e supportare anche i vecchi impianti olivicoli, migliorando i modelli imprenditoriali e adattando loro le varie nuove tecniche produttive, inclusa una difesa dalle avversità guidata da nuove tecnologie, che minimizzi ogni problema ambientale e sanitario.

In futuro, pertanto, le scelte politiche dovranno essere orientate da un lato a supportare le aree olivicole più vocate per poter competere sul mercato globale, dall'altro ad evitare l'abbandono degli oliveti nelle aree più marginali, fenomeno peraltro in preoccupante espansione, dove l'olivo rappresenta una preziosa risorsa paesaggistica e fondamentale per prevenire il dissesto idrogeologico.

Occorrono in conclusione professionalità, innovazioni, produttività e qualità.

Abbiamo visto che uno degli aspetti gestionali più critici per vecchi e nuovi impianti è rappresentato dalla difesa dai parassiti, in particolare alla luce delle nuove direttive UE, della Direttiva 128/2009 e del conseguente Piano d'Azione Nazionale (PAN) che hanno notevolmente aumentato il grado di complessità e la necessità di conoscenze (Rossi et al., 2012). Una tendenza ancor più severa in questo campo sembrerebbe avere la nuova agenda PAC Paesi comunitari per gli anni 2023-2027 (varata nel corso del mio Dottorato), con i suoi progetti 'Green deal' e le sue strategie 'Farm to Fork', che sta mirando a ridurre sempre più l'impronta ambientale e climatica del suo sistema alimentare, a guidare la transizione globale verso la sostenibilità competitiva dal produttore al consumatore, a proteggere la salute pubblica e salvaguardare le condizioni di vita degli operatori agricoli.

In questa urgenza a razionalizzare sempre più la nostra olivicoltura ed in particolare la relativa difesa fitosanitaria, un ruolo molto importante potrebbe essere rivestito dall'adozione dei DSS, sia nei vecchi che nei moderni impianti, sia nella conduzione integrata, che in quella biologica,

proprio grazie alla natura flessibile e olistica di questa tecnologia, in grado di rispondere alla complessità multifattoriale caratterizzante le nuove sfide nei diversi regimi di gestione aziendale (Rossi et al., 2014).

Nell'ambito degli aspetti sanitari dell'olivo, che verranno approfonditi nel prossimo Capitolo, e più precisamente su aspetti innovativi per la messa a punto di sistemi di supporto (Capitoli 4 e 5) ad una gestione sostenibile della difesa fitosanitaria si svilupperanno le ricerche della mia tesi.

2.5 Bibliografia

- Angelini R., et al., 2009. L'Ulivo e l'olio, Bayer CropScience (Coltura e cultura), Art Servizi Editoriali, Bologna, 768 pp
- Arzeni A., et al. 2018, Annuario dell'agricoltura italiana, volume LXXII, <https://www.crea.gov.it/web/politichee-bioeconomia/-/annuario-dell-agricoltura-italiana>
- Andrioli, Alberto. 2019. "L'olivicoltura Italiana va Rifondata, Altrimenti Non Ha Futuro." *L'informatore Agrario*, 6–9.
- Bandino, G., and S. Dettori. 2001. *Manuale Di Olivicoltura*. Edited by Regione autonoma della Sardegna.
- CREA, Annuario dell'agricoltura 2018 Andrioli, A. (2019). L'olivicoltura italiana va rifondata, altrimenti non ha futuro. *L'informatore Agrario*, 6–9.
- Angelini, R., Pisante, M., Inglese, P., & Lercker, G. (2009). L'ulivo e l'olio. In *Coltura&Cultura*. Bayer CropScience.
- Bandino, G., & Dettori, S. (2001). *Manuale di olivicoltura* (R. autonoma della Sardegna (ed.)).
- Caracuta, V. (2020). Olive growing in Puglia (southeastern Italy): a review of the evidence from the Mesolithic to the Middle Ages. *Vegetation History and Archaeobotany*, 29(5), 595–620. <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00765-y>
- Cola, M., & Sarnari, S. (2020). *La competitività della filiera olivicola analisi della redditività e fattori determinanti*. Rete Rurale Nazionale - Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali. <https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/22376>
- EPPO. (2018). PM 7/24 (3) *Xylella fastidiosa*. *EPPO Bulletin*, 48(2), 175–218. <https://doi.org/10.1111/epp.12469>

- European commission. (2021). *Olive oil quality checks in the EU*.
https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/plants-and-plant-products/plant-products/olive-oil_it
- Osservatorio Agroalimentare. (2021). *I valori del settore olivicolo italiano*.
<http://www.osservatorioagr.eu/approfondimenti/valori-del-settore-olivicolo-italiano/>
- Pupo D'Andrea, M. R. (2021). *L'analisi delle proposte della PAC 2023-2027 per il settore olivicolo-oleario*.
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457–479.
https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038
- Rossi, V., Salinari, F., Poni, S., Caffi, T., & Bettati, T. (2014). Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems: The example of vite.net. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.011>
- Sisti, A., & Sarnari, T. (2020). *L'Italia e la PAC Post 2020: Fabbisogni e Strumenti per una nuova Strategia del Settore Olivicolo-Oleario*.
- Tanasi, D., Greco, E., Noor, R. E., Feola, S., Kumar, V., Crispino, A., & Gelis, I. (2018). 1H NMR, 1H-1H 2D TOCSY and GC-MS analyses for the identification of olive oil in Early Bronze Age pottery from Castelluccio (Noto, Italy). *Analytical Methods*, 10(23), 2756–2763. <https://doi.org/10.1039/c8ay00420j>
- Vilar, J., Pereira, J. E., Urieta, D., Menor, A., Caño, S., Barreal, J., & Velasco del Mar, M., Puentes, R. (2018). *International olive growing. Worldwide Analysis and Summary*. (p. 168). Fundación Caja Rural de Jaén. www.fundacioncrj.es
- Vos, S., Camilleri, M., Diakaki, M., Lázaro, E., Parnell, S., Schrader, G., & Vicent, A. (2019). Pest survey card on *Xylella fastidiosa*. *EFSA Supporting Publications*, 16(6). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.en-1667>
- Wunsch, N. G. (2022). *Olive oil industry in Italy - Statistic & Facts*. Statista.
https://www.statista.com/topics/6013/olive-oil-industry-in-italy/#topicHeader__wrapper

CAPITOLO 3 - AVVERSITÀ E STRATEGIE DI DIFESA DELL'OLIVO

Come abbiamo visto nel precedente capitolo, tra le criticità dell'olivicoltura italiana, come accade per tutte le colture agrarie, un ruolo importante è rivestito dalle avversità, che possono ridurre notevolmente le produzioni, peggiorarne la qualità e talora minacciare la sopravvivenza degli stessi impianti. Negli ultimi decenni i cambiamenti climatici hanno peraltro peggiorato la dannosità di alcuni parassiti (Graniti et al., 2011), ampliandone l'areale, e hanno incrementato i rischi di arrivo di nuovi parassiti, favorendone la possibilità di acclimatazione.

Nonostante negli ultimi anni l'avvento della *Xylella* abbia attirato l'attenzione in maniera particolare, è importante ricordare che le avversità dell'olivo sono numerose, sia di origine biotica che abiotica (Goidanich, 1978; Prota, 1995; Ferrari et al., 1999; Ferrari et al., 2006; Agosteo, 2010; Ricciolini & Rizzo, 2010; Agosteo et al., 2008; Schena et al., 2011; Iannotta et al., 2012).

3.1 Quadro generale

Tra i danni da avversità abiotiche dominano quelli causati dalle condizioni climatiche, e in particolare dal freddo. L'area di coltivazione dell'olivo, infatti, non si estende al di sopra del 45° parallelo Nord e Sud, e la pianta subisce danni e morte con temperature da -10° C a -12° C (Mancuso, 2000). Questo fattore ha da sempre condizionato l'olivicoltura italiana, influenzando la latitudine massima di coltivazione dell'olivo. In alcune annate, il gelo ha determinato la distruzione di oliveti in intere regioni, come nel caso dell'anno 1929, in cui a seguito di una gelata si determinò una riduzione dell'areale di coltivazione dell'olivo nell'Italia del Nord. Un altro importante evento si registrò nel 1956, con la distruzione di innumerevoli oliveti dell'Italia centrale a seguito di una calaverna. Dopo intense ricerche e sperimentazioni, avviate soprattutto dopo quest'ultima calaverna, è aumentata la disponibilità di diverse varietà di olivo sufficientemente resistenti al freddo, tanto da permettere nuovamente la diffusione della cultura in pressoché tutte le nostre regioni settentrionali (Angelini et al., 2009; Alfei et al., 2016).

Il freddo, oltre che provocare lesioni corticali a rametti e branche, e portare nei casi più estremi alla morte della pianta, può causare anche danni indiretti. Nel corso della ripresa vegetativa

primaverile, gli organi vegetali diventano particolarmente sensibili al danneggiamento da freddo e il calo tardivo delle temperature spesso coincide con periodi umidi, seguiti dal ritorno alle temperature miti primaverili. Queste condizioni sono altamente predisponenti per l'attacco da parte di patogeni e in particolare aprono vie di entrata all'agente della "rogna" (Figura 1a), il batterio *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* (Janse) Gardan et. al. (Sanzani et al., 2012). Quanto alle avversità biotiche, gli attacchi più intensi e ricorrenti riguardano in particolare *Colletotrichum* spp., agente dell'Antracnosi (Figura 1b), *Venturia oleaginea* (Cast.) Hugh., agente dell'occhio di pavone (Figura 1c), tra i patogeni fungini; il summenzionato *P. savastanoi* pv *savastanoi* agente della rogna (Figura 1a) e la *Xylella fastidiosa* Wells, agente della cosiddetta Sindrome del disseccamento rapido dell'olivo (Figura 1d), tra i patogeni batterici; mosca (*Bactrocera oleae* Rossi), tignola (*Prays oleae* Bern.) e cocciniglie (*Saissetia oleae* (Oliv.), *Lichtensia viburni* Sign.), tra gli insetti.

(Oliv.), *Lichtensia viburni* Sign.), tra gli insetti.

Esistono tuttavia numerosi altri parassiti che, seppur pericolosi solamente in casi sporadici, possono a volte creare danni di un certo rilievo. A titolo informativo, tra i patogeni si ricordano gli agenti di: tracheovorticilliosi (*Verticillium* spp.), marciume radicale lanoso (*Rosellinia necatrix* (Hart.) Berl.), marciume radicale fibroso (*Armillaria mellea* (Vahl: Fr) Kummer), carie o lupa del legno (*Fomes*, *Fomitiporia*, *Perenniporia*, *Polyporus*, *Trametes*, ecc.), fumaggine (*Capnodium* sp., *Alternaria* sp., *Cladosporium* sp., ecc.), brusca parassitaria (*Stictis panizzei* De Not) e piombatura delle foglie (*Mycocentrospora cladosporioides* Sacc. (Braun.), nonché specie di *Phytophthora*, che possono colpire l'apparato radicale (Lo Giudice et al., 2010; Santilli et al., 2020), ma anche i frutti (Santilli et al., 2020), tra gli insetti si segnalano: fleotribo (*Phloeotribus scarabaeoides* Bern.), tripide (*Liotrips oleae* Costa), cotonello (*Euphyllura olivina* Costa), metcalfa (*Metcalfa pruinosa* Say), cimice asiatica (*Halyomorpha halys* Stål), tignole rodiscorza (*Euzophera bigella* Zeller, *Euzophera pinguis* Haworth), cerambicide dal collo rosso (*Aromia bungii* Faldermann) e vari afidi (*Aphis gossypii* Glover, *Aphis fabae* Scop., *Macrosiphum euphorbiae* Thomas, *Myzus persicae* Sulz.) (Ferrari et al., 2006; Angelini et al., 2009; Pollini, 2018; Matta et al., 2017).

Molti degli attacchi parassitari sull'olivo possono essere prevenuti o contenuti agendo sui fattori predisponenti. Gli agenti di carie, ad esempio, si possono inquadrare tra i parassiti opportunisti in quanto attaccano soprattutto piante vecchie, drasticamente potate o comunque indebolite. La lotta contro di essi deve quindi mirare soprattutto ad evitare un indebolimento delle piante e potature troppo energiche, con tagli troppo grandi.

Alcuni patogeni presenti nella rizosfera e agenti causali di malattie che interessano l'apparato ipogeo possono colpire anche i giovani impianti, come *Verticillium*, *Phytophthora* e *Rosellinia*, sono in genere favoriti da difficili condizioni del suolo (es. ristagni idrici), dalla diffusione di focolai in atto o da infezioni già presenti in vivaio. L'uso di materiale sano, la rimozione di eventuale materiale infetto da attacchi pregressi, una buona regimazione delle acque o, comunque, una buona gestione dell'impianto, pertanto, possono aiutare ad evitare gli attacchi di questi patogeni. Per *Verticillium*, inoltre, è stata dimostrata anche una certa differenziazione nella suscettibilità varietale (Pennisi et al., 1993; Sesli et al., 2010).

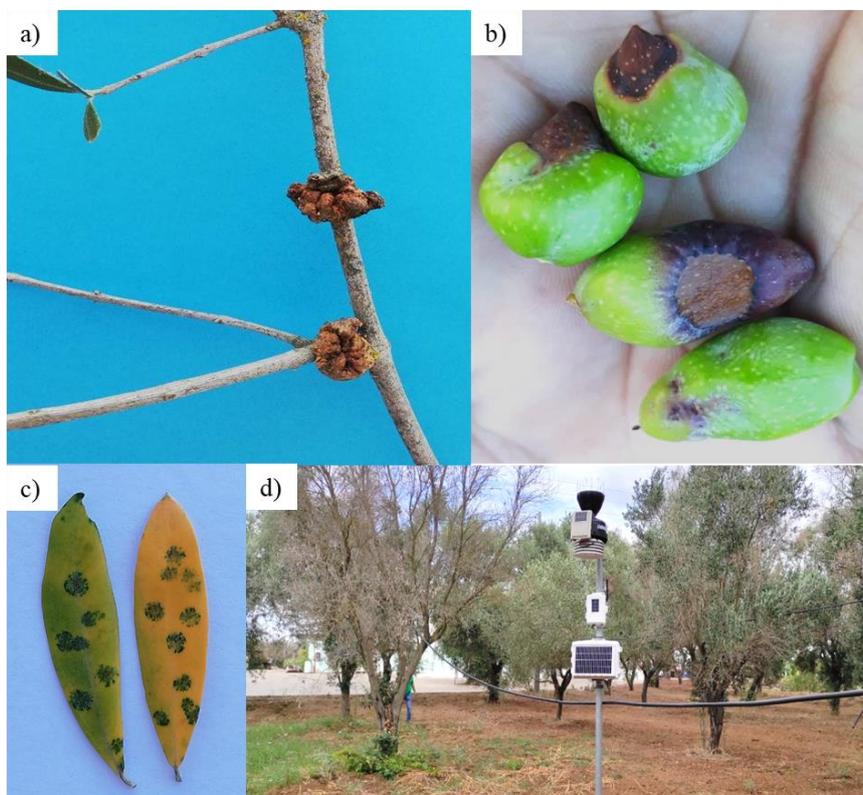


Figura 1. Esempi di attacchi di patogeni su olivo: manifestazioni di infezioni di *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* su rametti (a), *Coletotrichum* spp. sulle drupe, *Venturia oleaginea* su foglie e *Xylella fastidiosa* sulle branche (d).

Gli attacchi di alcuni patogeni possono essere favoriti dalla presenza di altri parassiti, come la fumaggine, quasi esclusivamente connessa ad attacchi di cocciniglie, oppure il tripide, che si sviluppa

nelle gallerie di fleotribo. In questi casi, tenendo sotto controllo i parassiti primari si frenano anche gli attacchi dei secondi.

L'ingresso della rogna dell'olivo, come detto precedentemente, è favorito da gelate invernali oppure dalle lesioni prodotte dall'uomo in seguito alla raccolta delle olive, soprattutto nel caso

in cui avvenga su piante bagnate. Evitando lesioni in queste fasi si evitano molte possibilità di infezioni.

La *Xylella* si diffonde soprattutto a mezzo dell'insetto vettore *Philaenus spumarius* L., la cosiddetta sputacchina, per cui combattendo questo vettore, si riduce notevolmente la pericolosità del patogeno (Almeida et al., 2005; Dongiovanni et al., 2016; Mezei et al., 2017). Molti attacchi parassitari (cocciniglie, tignole, alcuni patogeni fogliari) possono essere ridotti attraverso una oculata gestione della coltura, mantenendo, ad esempio, sempre ben areata la chioma, attraverso potature, o evitando eccessive concimazioni azotate, che sono causa di lussureggiamento della chioma.

Nei nuovi impianti, gli attacchi di molti parassiti specifici, come *Venturia oleaginea* e *Pseudomonas savastanai*, ma in parte anche *Colletotrichum* spp. o *Prays oleae*, possono essere evitati o notevolmente ridotti scegliendo varietà resistenti o poco suscettibili (Alfei et al., 2016). In definitiva molti dei numerosi parassiti dell'olivo possono essere contenuti senza interventi chimici, attraverso una attenta gestione delle tecniche colturali e, per i nuovi impianti, attraverso una oculata scelta del materiale di propagazione e una razionale pratica di messa a dimora.

Ciò non di meno, soprattutto per gli impianti in essere, ma anche per quelli di nuova costituzione, rimangono diversi pericolosi parassiti o vettori di parassiti contro i quali si è costretti a ricorrere alla lotta chimica.

Tra questi si ricordano in particolare: *Colletotrichum* spp e *Venturia oleaginea* tra i patogeni fungini, *Philaenus spumarius* (sputacchina media), vettore di *Xylella fastidiosa*, *Bactrocera oleae* e, più raramente, *Prays oleae* e le varie specie di cocciniglie, tra gli insetti.

Fortunatamente per la lotta contro alcuni di questi parassiti ci è stato molto di aiuto lo studio della soglia di intervento, attuando quella che un tempo veniva denominata "lotta guidata", attraverso un monitoraggio degli attacchi che unitamente ad una analisi delle condizioni climatiche e dello stato della pianta, ci permettono di stabilire la soglia di attacco oltre la quale conviene effettuare l'intervento.

Relativamente alla mosca e all'occhio di pavone dell'olivo, sono stati messi a punto idonei modelli previsionali, che permettono di stabilire, anche a livello comprensoriale, il momento in cui è necessario effettuare il trattamento (Anselmi et al., 2017). Relativamente a *V. oleaginea* rimangono comunque da chiarire alcuni aspetti del ciclo biologico che potrebbero ottimizzare l'espressione del sistema.

La presente Tesi è stata sviluppata intorno alla realizzazione di moduli per il Sistema di Supporto Decisionale olivo.net, per *Colletotrichum acutatum species complex*, agente dell'antracnosi e per *Philaenus spumarius*, vettore di *Xylella fastidiosa*, agente della Sindrome

del disseccamento rapido e all' apporto di chiarimenti sulla sporulazione di *Venturia oleaginea*, agente dell'occhio di pavone, volti a colmare le lacune sopra menzionate.

Prima di affrontare le illustrazioni delle singole ricerche si ritiene opportuno illustrare qui, più in dettaglio, il ruolo parassitario, le caratteristiche biologiche ed epidemiologiche e le misure di difesa finora perseguite contro tali organismi.

3.2 Antracnosi dell'olivo

Il fungo agente causale dell'antracnosi dell'olivo è stato segnalato per la prima volta in Portogallo da d'Almeida nel 1899 (Martín et al., 2002; Moral et al., 2008). La malattia è oggi diffusa in numerosi paesi del mondo, tra cui Portogallo, Spagna, Grecia, Italia, Montenegro, Giappone, Uruguay, Argentina, Brasile, Sud Africa, California, Cina, India, Australia e Nuova Zelanda (Margarita et al., 1986; Mugnai et al., 1993; Sergeeva & Spooner-Hart, 2010; Moreira et al., 2021). Essa, oltre a rappresentare la più importante malattia crittogamica dell'olivo a livello mondiale, raggiunge particolare incidenza e gravità nel bacino del Mediterraneo, in cui è endemica negli oliveti tradizionali di cultivar sensibili (Talhinhas et al., 2018).

In Italia, dove è conosciuta con il nome di "lebbra dell'olivo", fu segnalata per la prima volta da (Ciccarone, 1950) in alcune zone umide olivicole della provincia di Lecce; negli anni '50 si diffuse epidemicamente in tutta la Puglia, passando dai 5.000 ettari colpiti nel 1953, agli oltre 40.000 ettari nel 1960 (Saponaro, 1953; Martelli, 1960). Nello stesso periodo l'antracnosi è stata registrata in altre regioni italiane, come Calabria e Sardegna (Martelli, 1959; Marras, 1962). La prima comparsa di antracnosi in Italia determinò perdite dall'80 al 100% della produzione (Cacciola et al., 2012).

Dopo questa esplosione, la malattia regredì negli anni 70 rimanendo endemica nella Piana di Gioia Tauro e nel Salento, per poi manifestare estese recrudescenze negli ultimi decenni, soprattutto nell'Italia meridionale, ma con attacchi anche in altre regioni, quali Toscana, Umbria, Marche, Liguria, ecc. (Agosteo & Pennisi, 1994; Agosteo, 2010; Agosteo et al., 2003; Cacciola et al., 1996; Cacciola et al., 2001; Cacciola et al., 2007; Cacciola et al. 2012).

3.2.1 Agente causale: *Colletotrichum spp.*

L'agente causale dell'antracnosi dell'olivo è stato identificato per la prima volta come *Gloeosporium olivarum* Alm. (M. J. V. de Almeida, 1899); successivamente all'accertamento della sua indistinguibilità da *Gloeosporium fructigenum* Berk, agente causale del marciume amaro delle mele, e alla revisione del genere *Gloeosporium*, entrambe le specie sono state

trasferite e accorpate nella specie *Colletotrichum gloeosporioides* species complex (Penz.), anamorfo di *Glomerella cingulata* (Stonem.) Spaulding et v. Schrenk (Cacciola et al., 2012). *Colletotrichum gloeosporioides sensu lato* è un complesso eterogeneo di circa 600 specie, in grado di svilupparsi su molteplici ospiti.

Colletotrichum acutatum è stato invece identificato per la prima volta in Australia in piante di papaya (Simmonds, 1965) e più tardi è stato identificato come agente casuale di antracnosi anche in altre specie coltivate (Cacciola et al., 2012). Metodi vari prima (Cacciola et al., 1996; Agosteo et al., 1997; Pane et al., 1998), la disponibilità poi di strumenti di biologia molecolare per l'identificazione e la diagnostica, basati principalmente sulla regione *rDNA-ITS* (e talora *TUB2*, *ACT*, *CHS-1*, *HIS-3* e *GADPH*), hanno permesso di caratterizzare la popolazione di *Colletotrichum* e identificare come agente eziologico di antracnosi dell'olivo complessi di specie riconducibili a *C. gloeosporioides sensu lato* e a *C. acutatum sensu lato*, (es. *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds, *C. gloeosporioides*, *C. theobromicola* Delacr., *C. nymphaeae* Pass., *C. godetiae* Neerg.), spesso variabili da zona a zona, talora sovrapponibili, non sempre patogene e ben differenziate tra loro (Cacciola et al., 2012; Schena et al., 2014; Cacciola et al., 2001; Talhinhos et al., 2011; Talhinhos et al., 2009; Moral et al., 2021).

Al momento sono state identificate 18 specie di *Colletotrichum* associate all'antracnosi dell'olivo, di cui almeno 5 specie, seppur isolate da olivi sintomatici, non risulterebbero essere patogene. Attraverso ricerche che hanno coinvolto sei specie di *Colletotrichum* spp., Talhinhos et al. (2015) ha confermato come *C. acutatum* s.s. (insieme a *C. nymphaeae*) sia tra le specie più virulente, *C. gloeosporioides* s.s. e *C. rhombiforme* le meno virulente, con *C. godetiae* e *C. fioriniae* in posizione intermedia. Recentemente, l'impiego di un approccio di rilevazione quantitativa ha confermato come *C. acutatum* s.s. sia in Italia più virulento di *C. godetiae* (Moral et al., 2021; Schena et al., 2014).

Questi complessi mostrano un'elevata variabilità genetica e fenotipica che ha permesso l'identificazione delle diverse razze geografiche, sottopopolazioni e sottogruppi. Inoltre, recenti studi condotti in Sud-Italia confermano che il complesso *C. acutatum* è il più comune negli oliveti che, storicamente, hanno mostrato gli attacchi più gravi di antracnosi (Talhinhos et al., 2011).

In un recentissimo studio Moral et al. (2021) ha rafforzato l'ipotesi che specie autoctone di *Colletotrichum* in ogni luogo siano passate da altri ospiti all'olivo quando questo ha colonizzato nuove aree di coltivazione, piuttosto che essere arrivati da altri paesi.

Molto recentemente, il gruppo genetico A4 di *C. acutatum* è stato ufficialmente ascritto a una nuova specie chiamata *C. clavatum* successivamente messo in sinonimia con *C. godetiae* (Faedda et al., 2011; Damm et al., 2012).

È tuttavia prevedibile che ulteriori specie possano essere identificate come associate all'antracnosi dell'olivo e che possano variare anche le interazioni tra specie opportunistiche e quelle realmente patogene, anche se è comunemente accettato che le popolazioni patogene che causano epidemie nei vari paesi olivicoli si adattino bene sia all'ospite che all'ambiente (Cacciola et al., 2012).

In Italia, ad oggi, sembra che la specie prevalente sia *C. acutatum*, seguita da *C. gloeosporioides*, prevalente in Sicilia e *G. godetiae* (syn. *C. clavatum*), diffusa nelle aree olivicole della Puglia e della Calabria (Mosca et al., 2014; Talhinhos et al., 2018; Schena et al., 2017; Moreira et al., 2021; Licciardello et al., 2022).

3.2.1 Epidemiologia e fattori predisponenti

3.2.1.1 Sorgente di inoculo e diffusione

Il quadro tassonomico in rapida evoluzione di *Colletotrichum* spp. su olivo e i cambiamenti di popolazioni recentemente osservati, ostacolano il confronto degli studi epidemiologici condotti in tempi e paesi diversi. Ciò non di meno il ciclo biologico e le manifestazioni del patogeno seguono grossomodo andamenti simili.

Il patogeno sverna sugli alberi nei frutti mummificati oppure nei tessuti dei rametti infetti, che agiscono da principale fonte di inoculo primario (Moral et al., 2009).

Poiché lo stadio sessuale di *Colletotrichum* sembrerebbe assente o rarissimo su olivo, sono essenzialmente i conidi a diffondere la malattia. Essi sono prodotti da acervuli in una matrice mucillaginosa idrosolubile e vengono dispersi da spruzzi di pioggia e gocce d'acqua portate dal vento (Agosteo & Zappia, 2007; Cacciola et al., 2012; Moral & Traperò, 2012; Moral et al., 2012).

La malattia è policiclica, con infezioni secondarie che possono svilupparsi nel corso della stagione ad opera di conidi prodotti dai frutti mummificati e marcescenti, causando un improvviso aumento dell'incidenza dell'antracnosi. Il patogeno, infatti, si conserva e si moltiplica sia sui tessuti morti sia su quelli infetti, anche asintomatici, e pertanto tutti gli organi colpiti rappresentano fonte di inoculo per le infezioni, soprattutto autunnali. Questa capacità di sopravvivere e moltiplicarsi in assenza di sintomi può spiegare perché l'antracnosi causa spesso perdite di raccolto inaspettate (Moral et al., 2021).

In autunno sulla pianta si avviano generalmente diversi cicli di infezione, favoriti anche dal tipico clima autunnale piovoso e fresco, che se non interrotti portano ad una perdita consistente della produzione.

Il numero di cicli secondari è fortemente influenzato da diversi fattori agronomici, tra cui la cultivar, e ambientali, come la pioggia, le temperature e l'umidità, e la virulenza del patogeno (Moral et al., 2014; Cacciola et al., 2012; Romero et al., 2021).

Le mummie, oltre che per la produzione dei conidi, sono pericolose in quanto permettono il passaggio del fungo sui rametti della pianta attraverso il peduncolo e il suo insediamento nel legno. Nello stesso anno o in quello successivo, alla ripresa vegetativa, il fungo potrà così colonizzare i tessuti fogliari e le drupe in formazione.

Le foglie sono in grado di fornire livelli di inoculo più elevati rispetto ai rami, ma l'inoculo diminuisce durante l'estate in modo più marcato sulle foglie che sui rami, suggerendo che le prime possono fungere da serbatoi di inoculo a breve termine (Talhinhas et al., 2011).

È stato ipotizzato che *C. acutatum* non sia in grado di sopravvivere nei frutti caduti sulla superficie del terreno, in quanto soggetti a interrimento nel corso delle lavorazioni o distrutti da insetti e invasori secondari (Graniti et al., 1993). Allo stesso modo, sebbene si formino numerosi acervuli sulle foglie cadute a terra, è improbabile che queste foglie siano un potenziale serbatoio di inoculo (Cacciola et al., 1996).

Il ruolo della fase epifita o delle infezioni quiescenti di *C. acutatum* su foglie, germogli e rami come fonte di inoculo per le infezioni primarie è un aspetto controverso dell'epidemiologia dell'antracnosi. Il patogeno, oltreché da tutti i tessuti sintomatici, può essere isolato anche da quelli asintomatici, anche se con una bassa frequenza (Cacciola et al., 1996; Moral et al., 2009). Inoltre, mentre gli acervuli sono stati osservati su foglie sintomatiche in Grecia, Italia e Australia (Martelli, 1961; Zachos & Makris, 1963; Cacciola et al., 1996; Sergeeva et al., 2008), in Spagna non sono stati trovati sulle foglie in condizioni di campo (Moral et al., 2009).

3.2.1.2 Infezione

Le infezioni delle drupe sono favorite da temperature miti e da elevate precipitazioni autunnali, mentre le infezioni gravi delle foglie si verificano durante le primavere umide (Cacciola et al., 2012).

Alla ripresa vegetativa, in primavera, se le condizioni ambientali lo consentono, i conidi del fungo germinano attaccando i fiori e i frutticini in allegazione, dove però le infezioni rimangono in genere latenti per tutta l'estate, per poi presentarsi con i tipici sintomi sui frutti in fase di allegazione.

La germinazione dei conidi, che prevede anche la produzione di un appressorio (Thalinhas et al., 2018), si verifica solo con elevata umidità e/o in presenza di un velo d'acqua sugli organi, e con temperature comprese tra i 12 e i 22° C (temperatura ottimale intorno ai 20° C).

Il tempo di penetrazione varia da 1-9 giorni in frutti prossimi alla maturazione fino a un mese in drupe immature (Thalinhas et al., 2011).

Il patogeno, attraverso la produzione di cutinasi extracellulari, può entrare nelle drupe direttamente attraverso l'epicarpo; tuttavia, la gravità dei sintomi e il tasso di colonizzazione aumentano se le drupe sono danneggiate (Moral et al., 2008).

Le ferite sulla cuticola delle drupe causate da altri parassiti, soprattutto dalla mosca dell'olivo, forniscono vie alternative per l'ingresso del patogeno, contribuendo così a una maggiore gravità della malattia (Graniti et al., 1993; Sergeeva & Spooner-Hart, 2010).

Una correlazione tra l'incidenza e la gravità delle infezioni da antracnosi e gli attacchi di questo insetto è stata osservata in diverse aree olivicole europee (Graniti et al., 1993; Trapero Casas, 2003; Kramer-Haimovich et al., 2006). Le lesioni da ovodeposizione e i fori di uscita della mosca delle olive rappresentano un punto di ingresso delle infezioni. Inoltre, questo insetto può anche contribuire come vettore alla diffusione dei conidi, anche se in Calabria la percentuale di mosche contaminate dal *C. clavatum* si è dimostrata piuttosto bassa (<2%) anche in oliveti con gravi infestazioni (Agosteo et al., 2007).

3.2.1.3 Incubazione e latenza

In generale, la suscettibilità delle drupe di olivo alle infezioni di antracnosi aumenta con la maturità, anche se i frutti verdi di cultivar suscettibili possono essere colpiti in percentuale elevata (Moral et al., 2008). Graniti et al. (1993) hanno ipotizzato che, in condizioni di campo, le infezioni delle olive verdi rimangano quiescenti poiché gli appressori sono differenziati, ma non viene prodotto micelio sub-cuticolare fino a quando le drupe non iniziano a maturare.

Si ritiene quindi che l'ammonificazione sia cruciale per il passaggio del fungo dallo stadio quiescente-biotrofico a quello attivo-necrotrofico, sebbene manchino ancora prove dirette di questo meccanismo di patogenicità (Kramer-Haimovich et al., 2006; Miyara et al., 2008). Variazioni del pH e del contenuto di azoto nei frutti in corso di maturazione sono possibili segnali d'innescò della secrezione di ammoniaca (Prusky et al., 2001). Ad esempio, il pH modulerebbe la regolazione dell'espressione genica di fattori di virulenza, come *pelB* che codifica la pectato liasi (Yakoby et al., 2001).

Sulla superficie delle drupe marce il patogeno è in grado di sporulare e se sono presenti condizioni climatiche favorevoli, i conidi danno origine a cicli secondari di malattia; in

alternativa, le drupe possono disseccare e mummificare. Successivamente al disseccamento e alla mummificazione le drupe diventano fonti di inoculo per la stagione successiva (Sergeeva et al., 2008). Le infezioni latenti si possono manifestare anche su drupe già raccolte, durante la conservazione in magazzino, prima dell'avvio dell'estrazione dell'olio.

In condizioni di laboratorio, temperature tra i 10° C e i 30° C, in combinazione con umidità relativa superiore al 93%, rappresentano le condizioni ottimali di formazione degli acervuli. Tale processo può richiedere da 6 a 9 giorni di incubazione con temperature comprese tra 15° C e 25° C. La temperatura ottimale per la produzione di conidi sulle drupe infette è di circa 20°C, la sporulazione risulta essere più abbondante sulle drupe di varietà suscettibili (Moral & Trapero, 2012).

In condizioni sperimentali, i frutti immaturi sono stati colpiti in tutte le fasi fenologiche, ma le infezioni sono rimaste latenti per sette-otto mesi, fino all'inizio della maturazione dei frutti. La suscettibilità dei frutti è aumentata e il periodo di latenza è diminuito all'aumentare del grado di maturità.

La presenza di drupe infette sui rametti si è dimostrata condizione necessaria per il presentarsi dei sintomi sulle chiome, le piante infettate senza frutti, infatti, non hanno mostrato sintomi di appassimento delle foglie e il deperimento dei rami.

Questi risultati, in combinazione alla bassa frequenza di isolamento del patogeno su foglie e rami e alla tossicità degli estratti di colture fungine, hanno suggerito che la produzione di aspergillomarasma B, un derivato fitotossico della licomarasmina prodotta da *C. acutatum* nei frutti marci, determina l'induzione dei sintomi (Ballio et al., 1969; Moral, Cherifi, et al., 2009).

Il lungo periodo di incubazione e di latenza delle infezioni sui frutti in via di sviluppo consentono la sopravvivenza del patogeno durante l'estate, fungendo da importante fonte di inoculo per le epidemie autunnali (Graniti et al., 1993; Moral, Cherifi, et al., 2009). Poiché l'infezione sui frutti verdi dovrebbe avvenire durante i mesi estivi, caldi e secchi, essi hanno una probabilità inferiore rispetto ai fiori di essere infettati, in quanto l'infezione dei fiori avviene in primavera, quando le condizioni climatiche sono più favorevoli.

A supporto di ciò, è stato osservato che in Calabria, *C. clavatum* (Faedda et al., 2011) può essere isolato in modo consistente in estate e all'inizio dell'autunno dalla buccia e dalla polpa interna di drupe verdi asintomatiche, suggerendo l'esistenza di uno stadio endofitico nel ciclo vitale del patogeno (Agosteo et al., 2005). In accordo con Agosteo et al. (2005), Moral et al., 2009 hanno isolato il patogeno dall'endocarpo e dai semi di drupe sintomatiche e asintomatiche di alberi con infezioni naturali.

Il riconoscimento dell'importanza delle drupe e dei giovani frutti infetti come fonti di inoculo per le epidemie autunnali, così come la consapevolezza che l'appassimento delle foglie e il deperimento dei rami sono una sindrome secondaria della malattia che deriva dall'infezione dei frutti, modifica sostanzialmente le attuali conoscenze sul ciclo della malattia di antracnosi, con implicazioni rilevanti per la progettazione di migliori strategie di controllo.

3.2.2 *Quadro sintomatologico e danni*

I sintomi principali della malattia sono delle macchie marcescenti che si manifestano sul frutto (Figura 1b) a partire dall'invaiatura, di forma tondeggianti, depresse, e di colore bruno scuro, localizzate sulla parte distale, ma che possono via via espandersi fino a occupare l'intera drupa e disseccare. In condizioni di elevata umidità, sui tessuti colpiti si sviluppano gli acervuli, ben evidenti, rotondeggianti, nerastri e con setole, da cui poi emergono ammassi di conidi dall'aspetto gelatinoso e dal colore aranciato. Sulle drupe immature le infezioni sono meno presenti e si manifestano con aree bruno-marroni, a volte leggermente infossate. In primavera miti e piovose la malattia si può manifestare anche su infiorescenze, pedicello del frutto, germogli verdi e foglie, con clorosi e necrosi a partire dai margini, che proseguono in estate causando defogliazione e seccumi anche di rami e rametti.

Colletotrichum spp. è particolarmente virulento sulle infiorescenze dell'olivo e si manifesta con sintomi che possono spaziare dal collasso dell'intera infiorescenza alla necrosi dell'ovario, impossibilitando i bottoni fiorali di aprirsi (Moral et al., 2008).

In alcuni casi le infezioni che colpiscono i fiori possono rimanere latenti all'interno dell'ovario e i sintomi possono manifestarsi dopo l'allegagione, quando i frutti raggiungono le dimensioni di un grano di pepe (2-4 mm) o di un pisello (5-10 mm) (Moral, Cherifi, et al., 2009; Sergeeva et al., 2008). In entrambe queste fasi, si può manifestare cascola dei frutti, o in alternativa, con condizioni predisponenti, i frutti possono rimanere sulla pianta mostrando poi colonie sporulanti di *C. acutatum* e *C. gloeosporioides*.

Sebbene l'antracnosi dell'olivo risulti particolarmente dannosa nelle regioni meridionali, dove rappresenta il parassita più importante della coltura, recentemente si sono avute segnalazioni di presenza e danni del patogeno anche nelle regioni centrali e in Liguria

Gravi infezioni possono risultare nel disseccamento di rami o branche della pianta a causa della produzione di Aspergillomarasmine, tossine prodotte dal fungo all'interno dei frutti mummificati e che possono portare alla perdita dell'intera produzione (Ballio et al., 1969; Moral & Trapero, 2012; Cacciola et al., 2012).

Le defogliazioni determinano sofferenza per l'intera pianta e una certa ripercussione sullo sviluppo delle drupe. Sono tuttavia gli attacchi autunnali sulle drupe che inducono i danni più gravi, in particolare quando, con clima umido, piovoso e fresco, si possono verificare ripetuti cicli di infezione secondarie che, se non interrotti, portano ad una perdita consistente della produzione.

Gli attacchi sulle drupe si ripercuotono infatti sia sulla quantità che sulla qualità dell'olio, che assume un colore rossiccio, un sentore rancido, un'elevata acidità, un aumento dell'indice di perossido e del contenuto di aldeidi, una diminuzione della stabilità ossidativa, del contenuto di polifenoli e a-tocoferolo e modifiche nella composizione dell'estere alchilico (Mincione et al., 2004; Cacciola et al., 2012; Talhinas et al., 2018).

Con infezioni che superano il 30% dell'incidenza sulle drupe, l'olio non può più essere considerato extra-vergine, a seguito di quest'aumento di acidità dell'indice di perossido; quindi, anche con livelli bassi di malattia la qualità dell'olio può risultare alterata a tal punto da comprometterne la classificazione (Iannotta et al., 1999; Talhinas et al., 2018).

Con elevata pressione dell'inoculo e gravi attacchi della mosca dell'olivo durante la maturazione dei frutti, in cultivar sensibili la malattia può causare perdite quanti-qualitativi enormi sulla produzione di olive, che possono arrivare fino al 100% (Moral et al., 2008; Cacciola et al., 2012).

3.2.3 Strategia di difesa e gestione del patogeno

L'incidenza e la gravità dell'antracnosi dell'olivo sono soggette a variabilità in risposta alle condizioni ambientali, alla suscettibilità delle cultivar di olivo, alla densità delle chiome e alla virulenza della popolazione patogena.

In considerazione di ciò, la strategia di difesa dell'olivo dall'antracnosi, che si sovrappone in molte parti a quella utilizzata contro l'occhio di pavone, risulta fortemente legata alla prevenzione e all'applicazione integrata di mezzi agronomici, chimici e biologici.

La densità della vegetazione o dell'impianto, favorendo ristagni di umidità nella chioma, svolge un ruolo importante nell'incidenza della malattia. I danni presentano infatti una gravità maggiore negli oliveti ad altissima densità (circa 2000 piante/ha) rispetto a quelli a bassa (200 alberi/ha) o medio-alta densità (600-800 piante/ha) (Moral & Trapero, 2012).

Oltre a prevedere sesti di impianto ampi, adeguati alla vigoria delle piante, è opportuno pertanto eseguire accurate potature, con la rimozione e la bruciatura di rami infetti per ridurre la carica d'inoculo del patogeno, favorendo l'areazione e una maggiore penetrazione della luce solare nella chioma, e di conseguenza riducendo l'umidità e la bagnatura della vegetazione e creando

condizioni sfavorevoli alle infezioni. Durante la potatura è opportuno rimuovere tutti i rami che portano frutti mummificati, riducendo così la disponibilità di inoculo primaverile. Concimazioni equilibrate, soprattutto per quanto riguarda l'azoto e, adeguate irrigazioni, incidono sul mantenimento di un sano stato vegetativo delle piante (Moral & Trapero, 2012). Nelle aree geografiche dove l'antracnosi è endemica, si può ricorrere inoltre ad una raccolta anticipata delle drupe, in modo da sfuggire alle infezioni secondarie sulle drupe mature, che risultano estremamente suscettibili (Cacciola et al., 2012; Wharton & Diéguez-Uribeondo, 2004).

Inoltre, il ricorso a varietà resistenti, sia per nuovi impianti che nel recupero di vecchi oliveti, è considerato uno dei più efficaci metodi di controllo della malattia e di riduzione delle perdite di produzione (Cacciola et al., 2012).

In Italia, sulla base di osservazioni di campo nel meridione, sono state individuate cultivar altamente suscettibili, come Ottobratica e Corniola, suscettibili, quali Itrana, Sinopolese, Tondina e Carolea, moderatamente resistenti, come Cassanese e Leccino, e resistenti, quale la Santomauro (Cacciola et al., 2012). Da ricerche condotte in Spagna su 21 Cultivar, una certa resistenza sarebbe dimostrata anche da Frantoio e Leccino, insieme a Blanqueta, Empeltre, Koroneiki, Morona-D, Picual e Razzola (Moral et al., 2008). In Argentina, tuttavia, la cultivar Frantoio è stata segnalata come sensibile (Moral et al., 2008; Moral et al., 2009).

Un fattore importante che può influenzare la suscettibilità o meno di una cultivar all'antracnosi è data dal periodo di maturazione. La maggiore incidenza di antracnosi su cultivar tardive è connessa probabilmente alla prolungata esposizione delle drupe all' inoculo, mentre le cultivar precoci possono sfuggire all'attacco. In linea generale la raccolta va effettuata prima che i frutti siano completamente maturi, poiché con il procedere della maturazione, anche in cultivar resistenti aumenta la suscettibilità all'antracnosi (Moral et al., 2008).

In ogni caso, nelle aree ad alta incidenza della malattia, per un buon controllo delle piante non si può fare a meno dell'impiego di fungicidi a base di rame.

Sia nella lotta integrata che in quella biologica, i prodotti rameici risultano oggi insostituibili nella prevenzione delle infezioni di rametti, fiori, frutticini e drupe mature (autunno). Considerato che la densità di inoculo del patogeno raggiunge i valori più elevati in fase di fioritura e post-allegagione, i primi trattamenti fungicidi dovrebbero essere effettuati in queste fasi (Nigro et al., 2017). Ulteriori trattamenti sono invece da prevedere all' invaiatura, quando le infezioni primarie si palesano e le fruttificazioni del fungo sulle drupe possono dare avvio a serie di infezioni secondarie sulle olive sane.

Due o tre trattamenti preventivi, a base di poltiglia bordolese o ossicloruro di rame, nel periodo compreso tra settembre e dicembre, riducono fortemente invece lo sviluppo della malattia sulle drupe (Graniti et al., 1993).

Oltre che i prodotti rameici, anche i fungicidi a base di tebuconazolo e strobilurine hanno mostrato una buona efficacia contro l'antracnosi dell'olivo (Nigro et al., 2017), presentando inoltre la possibilità di essere utilizzati sia a scopo preventivo che a scopo curativo (Sergeeva, 2011).

Tuttavia, le frequenti piogge autunnali abbinate all'elevata umidità possono ridurre la persistenza dei fungicidi sulla pianta; in aggiunta va considerata anche la necessità di rispettare il periodo carenza dei prodotti fitosanitari in prossimità della raccolta. La combinazione di questi fattori può portare a una protezione insufficiente delle drupe in uno stadio di elevate suscettibilità e in un momento della stagione in cui le condizioni ambientali sono estremamente favorevoli allo sviluppo del patogeno (Cacciola et al. 2012; Zimbalatti et al., 1992).

Va inoltre considerata anche la tempistica di applicazione dei fungicidi che, soprattutto nel caso di prodotti rameici, riveste un ruolo cruciale. Le infezioni primarie sono fondamentali per un controllo efficace della malattia e una gestione inappropriata in questa fase può determinare un'elevata pressione della malattia nell'oliveto per tutta la stagione.

Il regolamento UE 1981/2018 sull'uso dei prodotti rameici e le restrizioni normative sull'uso dei prodotti fitosanitari in generale hanno però indirizzato la ricerca verso lo sviluppo di alternative più ecocompatibili per il controllo della malattia (Preto et al., 2017; Talhinhos et al., 2018).

Tra queste, i microrganismi rivestono un ruolo importante nelle nuove strategie di controllo biologico dell'antracnosi dell'olivo. *Bacillus subtilis* e *Aureobasidium pullulans*, in associazione con prodotti fitosanitari tradizionali, hanno mostrato buona efficacia nella riduzione dell'incidenza della malattia. L'applicazione di questi prodotti, in corrispondenza dello stadio fenologico di prefioritura, ha mostrato effetti comparabili a quelli dei prodotti anticrittogamici di sintesi, riducendo inoltre anche l'incidenza delle infezioni latenti sulle drupe. In aggiunta, alcuni ceppi endofitici di *A. pullulans* hanno mostrato elevate efficacia di protezione contro *Colletotrichum* spp. anche quando applicati in fase di pre-invaiatura (Nigro et al., 2017).

Recentemente, dal melograno è stata ottenuta una preparazione antimicotica naturale che sembrerebbe efficace per controllare l'antracnosi dell'olivo. L'estratto di buccia ha dimostrato una forte attività fungicida in vitro contro *C. acutatum* s.s. ed è stato molto efficace nelle prove sia preventive che curative con frutta inoculata artificialmente. Inoltre, è stata registrata la

resistenza indotta nei tessuti di olivo trattati con estratto di melograno. Tuttavia, i dati relativi all'applicazione e al posizionamento di questi trattamenti necessitano di ulteriore approfondimento (Pangallo et al., 2017; Pangallo et al., 2022).

Per le condizioni strutturali, tecniche ed ambientali descritte, il controllo diretto dell'antracnosi dell'olivo può a volte risultare problematico e nonostante tutte le misure vengano regolarmente applicate è possibile che attacchi improvvisi e incontrollati della malattia rappresentino un ostacolo allo sviluppo futuro del settore olivicolo (Cacciola et al., 2012).

Anche se gli elementi chiave dell'epidemiologia dell'antracnosi dell'olivo sono conosciuti, non sono disponibili strumenti di predizione dello sviluppo della malattia in oliveto e vi è la necessità di un miglioramento nelle strategie di difesa basate sull'utilizzo delle informazioni provenienti dall'utilizzo di tecnologie avanzate (Kolainis et al., 2020; Romero et al., 2021). Trovare pertanto un sistema in grado di stabilire l'effettiva necessità di effettuare il trattamento e il momento ottimale per eseguirlo rappresenta un'opportunità innovativa di grande importanza, che va a risolvere tutte le già indicate problematiche e che risulta di aiuto anche in caso di eventuali trattamenti alternativi.

I modelli, in quanto rappresentazioni semplificate della realtà, sono utilizzati in epidemiologia vegetale per descrivere, capire, predire e confrontare le epidemie e gli elementi che le compongono (de Wit, 1993; Rossi et al., 2010). Per questo motivo il numero dei trattamenti potrebbe essere notevolmente ridotto e la loro efficacia aumentata ricorrendo a dei Sistemi di Supporto Decisionale (DSS). Tali strumenti, definendo le relazioni tra patogeno, pianta ospite e ambiente, permettono di stabilire se e quando l'intervento di difesa si rende necessario.

3.3 Occhio di pavone

L'occhio di pavone (Figura 1c), conosciuto anche come vaiolo o cicloconio dell'olivo, è la più importante e comune malattia che colpisce l'olivo a livello nazionale e mondiale (Wilson & Miller, 1949; Goidanich, 1978; Ferrari et al., 1999; Alfei et al., 2016; Romero et al., 2018). Presente in pressoché tutte le zone di coltivazione, la malattia può colpire foglie, rametti erbacei e frutti, con danni frequentemente rilevanti se non correttamente gestita (Romero et al., 2018; Obanor, 2006).

3.3.1 Agente causale: *Venturia oleaginea* (Castagne) Rossman & Crous.

La malattia è provocata dal fungo *Venturia oleaginea* (Castagne) Rossman & Crous, riconosciuto e descritto per la prima volta nel 1845 in Francia e denominato *Cycloconium*

oleaginum (Schubert et al., 2013). *Fusicladium oleagineum* (González-Domínguez et al., 2017; Roubal et al., 2013; Viruega et al., 2011) e *Spilocaea oleaginea* (Moral et al., 2015; Obanor et al., 2011; Viruega et al., 2013) sono i sinonimi più comunemente usati per questo patogeno, anche se recentemente è stato definito il nome *Venturia oleaginea* sulla base della sua identificazione genetica (Rossman et al., 2015).

V. oleaginea è un fungo biotrofo che difficilmente cresce in terreno di coltura (Petri, 1913; Saad and Masri 1978; Viruega et al., 2011).

Si tratta di un fungillo caratterizzato da conidi piriformi, bruni, generalmente bicellulari e più raramente mono o tri cellulari, con setto trasversale, portati da conidiofori solitari ampolliformi o sub globosi, unicellulari, delle dimensioni da 8 a 15 μm , emergenti dalla superficie fogliare (Graniti, 1993; Schubert et al., 2013).

Esso si insedia in genere perforando la cuticola della pagina superiore, per poi diffondersi in questa con un micelio composto da colonie monostratificate, parallele alla superficie, di forma circolare, dapprima invisibili all'esterno, poi in parte emergenti, brune e vellutate quando il fungo fruttifica (Graniti, 1993; Schubert et al., 2013). A completamento del suo sviluppo sub-cuticolare e al termine del periodo latente, il fungo differenzia infatti rami miceliari orientati verso l'alto, che perforando la cuticola, danno origine a brevi conidiofori unicellulari, di colore bruno-oliva, ai cui apici si formano singoli conidi.

Nei piccioli, nelle nervature e nei peduncoli il patogeno può talora approfondirsi anche nei primi strati dell'epidermide e del parenchima (Graniti, 1993).

3.3.2 Epidemiologia e fattori predisponenti

In condizioni favorevoli *V. oleaginea* è in grado di prosperare sull'ospite durante tutto l'arco dell'anno (Graniti, 1993).

3.3.2.1 Sorgente di inoculo e sporulazione

Le foglie infette di olivi coltivati e di olivi selvatici sono considerate le uniche fonti di inoculo perché *V. oleaginea* è un parassita obbligato ed è specifico per questi ospiti (Viruega et al., 2013). L'inoculo per l'infezione primaria è fornito dai miceli svernanti su foglia che, in condizioni predisponenti di umidità e temperatura, sono in grado di produrre conidi (Guechi & Girre, 1994; Obanor et al., 2011). Studi recenti hanno inoltre dimostrato che *V. oleaginea* può rimanere vitale nelle foglie cadute per un certo periodo di tempo e produrre abbondanti conidi, che tuttavia non costituiscono una fonte importante di inoculo per nuove infezioni (Prota, 1958; Laviola, 1966; Graniti, 1993; Guechi & Girre, 1994; Obanor, 2006).

La quantità di conidi di *V. oleaginea* e la loro vitalità variano a seconda degli oliveti e delle stagioni (Guechi & Girre, 1994; Obanor, 2006; Obanor et al., 2011), spesso il maggior numero di conidi viene prodotto in primavera dalle colonie miceliari svernanti (Obanor, 2006; Obanor et al., 2008).

I periodi secchi e caldi rappresentano condizioni limitanti per il patogeno, che può però conservarsi vitale sugli organi colpiti durante tutte le stagioni, mantenendosi quiescente durante periodi sfavorevoli, per poi emergere durante periodi umidi, piovosi e con favorevoli temperature intermedie (Graniti, 1993).

Nelle regioni olivicole mediterranee la produzione di conidi attraverso le lesioni presenti sulle foglie che rimangono sull'albero è massima in ottobre e novembre e in marzo e aprile, mentre è bassa durante l'estate. Tuttavia, la sporulazione dipende dalle condizioni climatiche, in particolare dagli eventi piovosi, dall'umidità e dalla temperatura, che sono simili alle condizioni ottimali per la crescita del fungo durante l'autunno e la primavera e la variazione stagionale e annuale della produzione di conidi è poco conosciuta (Saad and Masri, 1978; Tosi & Zizzerini, 2000); Viruega et al., 2013).

In uno studio di Viruega et al. 2013 viene preso in analisi l'andamento della sporulazione in diverse stagioni olivicole. Nella stagione 1993-94, il patogeno ha prodotto conidi dalla fine di ottobre alla fine di giugno, mentre nel 1994-95 dalla fine di novembre a luglio; la germinazione dei conidi era compresa tra il 2 e il 73%. Nel 1994-95, il patogeno ha prodotto conidi durante l'inverno, con un picco a dicembre e un altro a febbraio. Esso, tuttavia, non ha mai prodotto conidi durante il periodo estivo, ad eccezione dell'anno 1997, quando sono stati rilevati alcuni conidi nei mesi di luglio e agosto. Relativamente alla vitalità dei conidi, il numero massimo di conidi vitali per unità di superficie di lesione è stato nei mesi di novembre e dicembre (Viruega et al., 2013).

In questo studio, e in altri condotti precedentemente con oggetto la diversità genotipica di questo fungo, non sono stati osservati i corpi fruttiferi sessuali di *V. oleaginea*, sostenendo la predominanza della moltiplicazione asessuata (Wilson & Miller, 1949; Graniti, 1993; Guechi & Girre, 1994; Viruega et al., 2013; Obanor, 2006; Obanor et al. 2008).

In autunno, quando la maggior parte delle foglie con macchie visibili sono cadute, per esempio in seguito ad una lunga estate secca, i miceli originati dalle infezioni primarie latenti della primavera precedente riprendono a crescere e vengono prodotti nuovi conidi (Graniti, 1993; Trapero et al., 2010).

Nuovo inoculo può derivare sia da foglie con infezioni quiescenti che riprendono a crescere e diventano manifeste, sia da minuscole macchie con numerosi conidiofori attivamente sporulanti. (Graniti, 1993; Viruega et al., 2013).

Anche le lesioni sui piccioli, sulle drupe e sui peduncoli possono rappresentare fonte di inoculo che tuttavia non è significativo (Viruega et al., 2013; Graniti, 1993; Trapero et al., 2010).

3.3.2.2 Diffusione

La diffusione dell'inoculo di *V. oleaginea* è stata oggetto di numerosi studi, grazie anche alle specifiche caratteristiche morfologiche dei conidi che rendono semplice l'identificazione una volta raccolte con captaspore.

I conidi vengono disseminati dalla pioggia (Loprieno & Tenerini, 1959; Graniti, 1993; Obanor et al., 2011) e limitatamente dal vento (Lops et al., 1993) e possono, a loro volta, produrre nuove infezioni. Poiché l'olivo è un albero sempreverde, numerosi cicli infettivi possono aver luogo tutto l'anno, ogni volta che si verificano condizioni favorevoli.

I conidi di *V. oleaginea* provenienti da lesioni nella parte superiore degli alberi sono generalmente trasportati verso il basso dall'acqua piovana e questa dispersione basipeta, almeno in parte, spiega la maggiore gravità della malattia nelle parti inferiori della chioma (Wilson and Miller 1949; Laviola, 1968).

La dispersione delle spore avviene anche per via anemofila, soprattutto in presenza di elevata umidità (>90%), ma tale mezzo di diffusione non è particolarmente rilevante (Viruega & Trapero, 1999; Lops et al., 1993; Graniti, 1993). Una così limitata dispersione aerea apparentemente limitata può essere spiegata in vari modi, uno dei quali è che i conidi non si staccano facilmente, e difficilmente il vento riesce a rimuoverli dalle lesioni (Wilson e Miller 1949). Al contrario, le gocce d'acqua lasciate cadere sulle lesioni sono in grado di rimuovere i conidi. È possibile, pertanto, che almeno parte dell'inoculo sia in grado di diffondersi in gocce d'acqua contenenti conidi e trasportate dal vento (Wilson & Miller, 1949; Viruega et al., 2013). Anche indagini condotte in oliveto in Italia hanno dimostrato che le spore di *V. oleaginea* si diffondono principalmente come inoculo aereo, ma solo durante i periodi di pioggia e solo un piccolo numero di conidi può essere diffuso anche dal solo vento fino a un massimo di 20 metri dalla fonte di inoculo (Lops et al., 1993; De Marzo et al., 1993). È stata osservata, inoltre, una correlazione lineare positiva tra il numero di conidi intrappolati nel raggio di 40 metri dalla fonte di inoculo e le precipitazioni, sottolineando come l'inoculo venga disperso grazie agli schizzi d'acqua solo per un raggio limitato. Il numero di conidi dispersi è altresì diminuito esponenzialmente con l'aumentare della distanza dalla fonte di inoculo; per fare sì che i conidi

potessero raggiungere distanze superiori a 40 metri sono stati necessari più di 60 mm di pioggia, confermando la tesi che il trasporto da una pianta all'altra può avvenire attraverso il trasporto di goccioline generate dall'effetto splash e sottolineando l'effetto esiguo del vento sulla dispersione del patogeno.

Infine, la rugiada può consentire un limitato grado di dispersione verticale dei conidi all'interno della chioma dell'olivo (Viruega et al., 2013) e negli oliveti dell'Italia meridionale è stato osservato che i conidi di *V. oleaginea* possono essere disseminati da insetti vettori come *Ectopsocus briggsi* Mac Lachlan (Psocottero) (De Marzo et al., 1993).

La vitalità dei conidi si protrae per mesi, ma una volta staccati dal conidioforo, muoiono in pochi giorni (Graniti, 1993).

3.3.2.3 Infezione e sviluppo delle lesioni

Il periodo di maggiore rischio per l'infezione e lo sviluppo della malattia si verifica all'inizio della primavera a causa della presenza concomitante di conidi del patogeno, delle condizioni climatiche favorevoli e della presenza di foglie in sviluppo (Viruega & Traperò, 1999). Tuttavia, nelle regioni in cui le piogge sono frequenti anche durante le estati miti, come in Nuova Zelanda, l'infezione può verificarsi durante tutto l'anno (Obanor, 2006).

I focolai di malattia sono fortemente legati agli eventi piovosi (Roubal et al., 2013; Obanor et al. 2011). Le infezioni più gravi si verificano durante i frequenti periodi piovosi della primavera e dell'autunno, con stasi estiva e invernale che variano da una zona all'altra. Nelle zone temperate la malattia può svilupparsi anche durante l'inverno, mentre al contrario in aree con inverni rigidi la stasi invernale è piuttosto lunga, abbreviando di conseguenza anche quella estiva (Angelini et al., 2009).

Il periodo di bagnatura fogliare richiesto a *V. oleaginea* perché avvenga l'infezione è maggiore di dodici ore, un tempo insolitamente lungo tra i patogeni fungini fogliari. La modalità di infezione di *V. oleaginea* è comunque simile a quella di *Venturia inaequalis* (Cooke) Wint. (agente della ticchiolatura del melo): il patogeno penetra nell'ospite in maniera attiva, attraverso l'emissione di un'ifa fungina per poi colonizzare lo strato più esterno dell'epidermide, a livello sub cuticolare, dove cresce parallelamente alla superficie fogliare fino a formare delle colonie tondeggianti, appiattite e monostratificate (Graniti, 1993; Magarey et al., 2005, Viruega et al., 2011)

La colonia rimane limitata alla zona sotto cuticolare dell'epidermide, portando alla formazione di uno stroma. Le lesioni sono inizialmente impercettibili a occhio nudo finché non si

producono conidiofori sullo stroma, rompendo lo strato cuticolare, e determinando la sporulazione (Graniti, 1993).

Durante la fase di germinazione del conidio, che richiede dalle 36 alle 48 ore di condizioni favorevoli, viene emesso un tubo germinale di colore da ialino a marrone chiaro. La formazione dell'appressorio richiede circa sei ore dai primi segni di germinazione (Obanor et al. 2008).

Le ricerche svolte in merito alle condizioni ambientali favorevoli alla germinazione dei conidi presentato dei risultati contraddittori. Alcuni autori indicano come temperature cardinali per la germinazione dei conidi: minima di 5°C, ottimale di 20°C e massima di 30°C (Wilson & Miller, 1949; Dzaganiya, 1967). Tuttavia, (Saad & Masri, 1978) hanno dimostrato come sulle superfici fogliari dell'olivo la germinazione avvenga a temperature comprese tra 8 e 24 °C, con un optimum di 20 °C, mentre (Mijuskovic, 1968) ha riferito che la germinazione avviene tra i 7° e i 28° C, con un range ottimale tra i 14 e i 19° C. L'intervallo di temperatura più ampio riportato per la germinazione delle conidi è stato da 2 a 34°C (Graniti, 1993), con un optimum stimato tra 12 e 15°C (Loussert & Brousse, 1978) o tra 16 e 22°C (Chen & Zhang, 1983; Graniti 1993). Secondo (Pettinari, 1957) la germinazione richiede in genere 24-36 ore a 12° C e 18 ore a 18° C. Egli ha inoltre definito che per periodi di bagnatura inferiori a 24 ore, l'optimum di temperatura è di 20°C, mentre periodi di bagnatura >24 h, l'optimum era di circa 15°C.

Per germinare, i conidi necessitano infatti di un'umidità relativa prossima alla saturazione (>95%) e di prolungata bagnatura delle foglie (Dzaganiya, 1967; Obanor et al., 2011; Viruega et al., 2002; Matta et al., 2017). La durata minima della bagnatura fogliare perché avvenga la penetrazione del patogeno nelle foglie dell'ospite è stata stimata variare tra 1 e 2 giorni, a seconda della temperatura (Graniti, 1993).

Tra le condizioni favorevoli al fungo vi è la scarsa circolazione dell'aria all'interno della chioma, che determina la presenza elevata di umidità e il prolungamento della bagnatura dei tessuti. Gli attacchi del fungo appaiono infatti più intensi in piante con chiome molto dense, poco arieggiate e illuminate, riuscendo a diffondersi meglio in pianura e in piantagioni fitte piuttosto che in collina e in ambienti ventilati.

Purtroppo, sono relativamente pochi gli studi di campo che hanno approfondito e riportato una relazione tra temperatura, umidità della foglia e sviluppo dell'occhio di pavone (Obanor, 2006)., nonostante l'importanza di queste variabili e la necessità di considerarne le relazioni.

Il calcolo dei periodi favorevoli all'infezione negli oliveti è spesso difficile poiché i periodi di bagnatura continua sono frequenti durante la primavera e l'inizio dell'estate e poiché i conidi sulle superfici fogliari sono spesso soggetti a periodi alternati di bagnatura e siccità prima che si verifichi l'infezione (Prota, 1958). Inoltre, la durata di un periodo asciutto che si frappone in

un periodo umido continuo, riduce la gravità della malattia e influenza la sopravvivenza dei conidi di *V. oleaginea*, ma al momento non sono disponibili informazioni sull'effetto che un periodo interrotto di bagnatura potrebbe avere sulla germinazione dei conidi e sul processo d'infezione (Becker & Burr, 1993; Aylor & Sanogo, 1997).

L'età della foglia è un ulteriore fattore d'interesse per l'infezione. L'occhio di pavone può svilupparsi su foglie di tutte le età (Obanor et al., 2011), ma il tasso di germinazione dei conidi è inferiore sulle foglie vecchie rispetto a quelle giovani, il che ridurrebbe la suscettibilità delle foglie vecchie in termini di numero di lesioni prodotte (Roca et al., 2007; Moral & Trapero, 2012). Considerata questa resistenza ontogenetica delle foglie all'infezione da parte di *V. oleaginea*, i principali periodi di infezione si possono verificare durante la crescita vegetativa, che nell'emisfero settentrionale avviene da marzo a metà luglio. Un secondo periodo favorevole per l'infezione avviene durante il secondo periodo di crescita, anche se meno rilevante, che si verifica tra settembre e metà ottobre (Obanor et al., 2011).

La grande importanza dell'infezione primaverile per le epidemie dell'occhio di pavone è stata sottolineata in diversi studi anche sulla base del fatto che le foglie giovani in questa fase non sono protette dai fungicidi (Schnabel et al., 1999; Roca & Trapero Casas, 2010; Viruega et al., 2013).

In aggiunta, l'intensità di attacco della malattia dipende anche dalla suscettibilità varietale, correlata con il contenuto di oleuropeina nelle foglie, che agisce da forte inibitore dello sviluppo del patogeno (Iannotta & Monardo, 2004; Cristinzio et al., 2011; D'ascenzo et al., 2014; Alfei et al., 2016).

Anche il tempo necessario per l'espressione dei sintomi dopo l'infezione fogliare è risultato fortemente dipendente dalla temperatura, variando da 12 giorni con 16-20°C a 16-19 giorni con 21-25°C; tale periodo è inoltre influenzato dalla cultivar di olivo, dalle condizioni ambientali in generale, dall'età delle foglie e dalla crescita stagionale degli alberi (Chen & Zhang, 1983). In Italia, il periodo di incubazione è di circa 15 giorni in presenza di temperature (20°C) e di umidità favorevoli (Salerno, 1966); tuttavia, se l'infezione è seguita da un periodo caldo e secco, possono essere necessarie diverse settimane o addirittura mesi perché le lesioni diventino evidenti (Andreucci & Bonifacio, 1969; Graniti, 1993).

Per sfuggire al caldo estivo, le infezioni primaverili di solito rimangono latenti fino all'autunno o all'inverno successivo, quando le condizioni ambientali permettono lo sviluppo delle caratteristiche lesioni (Viruega et al., 2013).

Oltre a essere influenzato dalle condizioni ambientali, il periodo di incubazione è anche influenzato dall'età delle foglie. I periodi di incubazione più lunghi (>174 giorni) sono stati

osservati sulle foglie più vecchie mentre per foglie più giovani essi risultano assai più brevi (circa 30 giorni) (Obanor, 2006).

Dato che il periodo di incubazione di questa malattia è lungo anche in condizioni favorevoli, è possibile che nel clima mediterraneo si verifichino al massimo 3 o 4 cicli di malattia all'anno, prevalentemente dall'inverno alla primavera.

I fattori che determinano il passaggio di *V. oleaginea* dall'infezione latente alla lesione attiva non sono noti, ma l'umidità delle foglie sembra essere essenziale, come suggeriscono le differenze evidenziate tra prove comparative in camera di crescita (senza umidità) e in un ombrario (688 ore di umidità): in quest'ultimo le infezioni evase erano più numerose che nell'ambiente asciutto. Anche le osservazioni in campo sono in accordo con questa ipotesi, poiché anche in questo contesto le lesioni compaiono dopo lunghi periodi di umidità (Aylor, 1995; De Marzo et al., 1993; Moral & Trapero, 2009).

Tali lesioni apparivano in inverno e in primavera come piccole macchie scure, ben definite, con la tendenza ad espandersi e unirsi, continuando a produrre abbondanti conidi durante la loro espansione (Miller, 1949). All'inizio dell'estate, le stesse lesioni hanno sviluppato deboli aloni intorno alle macchie e hanno mostrato una debole produzione conidica. Durante le estati calde e asciutte le lesioni smettevano di espandersi e diventavano secche, indurite, screpolate o vescicate.

Queste lesioni essiccate e danneggiate dal calore non hanno prodotto nuovo inoculo durante l'autunno. Non è stata però definita la causa di questo comportamento delle lesioni di *V. oleaginea* durante i mesi estivi, né è stato chiarito se vi sia un effetto sinergico della temperatura e della bassa umidità nel determinare tale risultato.

3.3.3 Quadro sintomatologico e danni

V. oleaginea può attaccare tutte le parti verdi della pianta, dalle drupe ai peduncoli, ma gli attacchi più significativi si hanno sulle foglie, in particolare sulla pagina superiore (Wilson & Miller, 1949), dove si manifestano con evidenti macchie circolari da verde oliva a olivaceo scuro, che via via si estendono fino ad un diametro di 10-14 mm, assumendo una colorazione grigio-rossastra al centro e bruno scuro all'esterno (Loprieno & Tenerini, 1959). Le macchie, nel tempo virano di colore verso una tonalità più scura a seguito della eruzione di conidiofori e conidi sulla superficie (Ricciolini & Rizzo, 2010).

Durante i mesi caldi, le macchie si circondano di un alone giallastro così da prendere le somiglianze degli "occhi" delle penne di pavone, da cui il nome "occhio di pavone" (Loprieno & Tenerini, 1959; Graniti, 1993). A fine ottobre e novembre, queste macchie aumentano di

dimensioni fino raddoppiare il loro diametro nel giro di poche settimane (Wilson & Miller, 1949).

Quando le lesioni si espandono, il resto della lamina fogliare diventa giallo (figura 1a) e la foglia cade dall'albero. Le lesioni sono notevolmente più abbondanti sul fogliame nelle parti inferiori degli alberi, così che molti dei rametti in queste parti diventano completamente defogliati e talvolta, disseccano.

In ogni caso le infezioni tendono a rimanere circoscritte a livello sub cuticolare a causa dell'elevato accumulo di sostanze fenoliche prodotte dalla pianta in risposta all'attacco fungino ed accumulate nella foglia. Oltre all'accumulo di sostanze polifenoliche sintetizzate *ex-novo*, vengono mobilitate e degradate anche le sostanze fenoliche già stoccate nella foglia, i cui prodotti di idrolisi, in particolare oleuropeina, svolgono una importante funzione difensiva contro le attività parassitarie del fungo, impedendone l'approfondimento nel mesofillo fogliare a seguito dell'inattivazione dei suoi enzimi litici (Graniti, 1993). Il risultato di questo processo è che il tessuto fogliare che circonda il fungo diventa resistente all'azione degli enzimi pectolitici e viene impedito ogni successivo avanzamento del patogeno. Tuttavia, quando la foglia invecchia queste difese diventano meno efficienti e il patogeno può estendersi verso l'epidermide e il mesofillo. Per questo motivo i sintomi sono molto meno frequenti ed evidenti sulla pagina superiore, in quanto ostacolati nella crescita e in parte nascosti dai grossi peli che ricoprono la pagina inferiore. Spesso sulla pagina inferiore l'infezione è rilevabile solo attraverso annerimenti o leggeri imbrunimenti di parte della nervatura mediana (Zarco et al., 2007; Ricciolini & Rizzo, 2010).

Sui rametti erbacei le lesioni si vanno a localizzare nelle parti più tenere, provocando macchioline necrotiche simili a quelle delle foglie. Gli attacchi sulle drupe avvengono più raramente e si distinguono per la presenza di piccole macchiette, di qualche mm di diametro, lievemente infossate e di colore bruno (Graniti, 1993).

Le necrosi causate dalla malattia riducono inevitabilmente la funzionalità degli organi interessati e la fotosintesi clorofilliana. Quando una foglia viene colpita da più macchie, finisce generalmente per ingiallire e cadere. Forti attacchi provocano pertanto una intensa filloptosi e cascola anticipata, che può interessare alcune branche o l'intera chioma, soprattutto durante l'estate, quando gli attacchi interagiscono con la siccità, lasciando spesso le piante pressoché completamente defogliate, con conseguenti ripercussioni sull'attività vegetativa e produttiva della pianta (Viruega et al., 2013), (Angelini et al., 2009), (Graniti, 1993).

Il danno indotto dalla malattia è proporzionale all'entità dell'attacco ed è determinato dalla progressiva defogliazione delle piante, che si riflette negativamente sul relativo vigore vegetativo.

Nel caso in cui la defogliazione si verifichi prima della differenziazione a fiore delle gemme ascellari, essa può determinare, nell'anno successivo, una sensibile diminuzione della fruttificazione e un conseguente aumento dei macroblasti (Castellani, 1952; Morettini, 1951).

La sofferenza delle piante può tradursi anche in una ridotta crescita e qualità dei frutti.

In condizioni favorevoli alla malattia, le perdite complessive di produzione in olive possono raggiungere anche il 50-60%, sia su cultivar da tavola che da olio. In queste ultime, a seguito di forti attacchi, si può osservare anche un ritardo nella maturazione e una diminuzione della qualità dell'olio prodotto. I danni maggiori si osservano in oliveti con sesto d'impianto particolarmente fitto e di conseguenza scarsamente ventilati (Graniti, 1993).

In Italia, le maggiori infezioni di occhio di pavone si hanno nelle zone olivicole centro-settentrionali, caratterizzate da stagioni vegetative fresche, piovose e umide, dove temperature relativamente basse e alta umidità all'interno dell'agroecosistema oliveto tendono a favorire la proliferazione del patogeno.

3.3.4 Strategia di Difesa e gestione del patogeno

La difesa dagli attacchi di occhio di pavone parte dalle scelte agronomiche e d'impianto.

Diverse cultivar di olivo mostrano differenti livelli di suscettibilità al patogeno. Le cultivar Cassanese, Cipressino, Gentile di Chieti, Leccino, Kalinjot, Pendolino sembrerebbero meno suscettibili alla malattia, così come in parte anche Cellina di Nardò, Dolce Agogia, Ottobratica, Zaituna, mentre Coratina, Frantoio, Peranzana, Rotondella risultano mediamente suscettibili, con Carolea e Moraiolo altamente suscettibili (Graniti, 1993).

In merito alle scelte agronomiche, sono utili per il contenimento e il controllo del patogeno, le potature che favoriscono l'arieggiamento e la penetrazione dei raggi solari all'interno della chioma, le irrigazioni che ne evitino la bagnatura, come ad esempio l'irrigazione a goccia, lo sfalcio dell'erba sotto chioma, soprattutto in oliveti dove gli attacchi sono ricorrenti.

La potatura dovrebbe produrre alberi aperti e ariosi, che permettano la penetrazione di luce e calore, consentendo un rapido asciugamento delle superfici fogliari e, di conseguenza, riducendo lo sviluppo della malattia. Inoltre, gli alberi aperti consentono una migliore penetrazione e copertura da parte dei fungicidi, migliorando così il controllo (Holb et al., 2001).

Durante la messa a dimora di un oliveto oltre che utilizzare, ove possibile, cultivar meno suscettibili, sarebbe preferibile scegliere sesti d'impianto ampi, che non favoriscano il ristagno di umidità nella chioma.

Tuttavia, i sesti di impianto ampi non sono compatibili con piantagioni moderne e intensive, estremamente fitte per favorire le operazioni di raccolta meccanizzata e per raggiungere maggiori produzioni; in questi casi può essere utile la scelta corretta della varietà.

I fungicidi chimici rappresentano tuttavia il principale metodo di controllo dell'occhio di pavone dell'olivo in tutte le regioni olivicole del mondo (Lopez Villalta, 1999). In zone dove la malattia è ricorrente, è infatti estremamente difficile non fare ricorso alla lotta chimica e all'utilizzo di prodotti anticrittogamici, principalmente a base di rame, intervenendo però solo al raggiungimento della soglia di danno economico (Iannotta et al., 2002; Obanor et al., 2005; D'ascenzo et al., 2014; Alfei et al., 2016; Matta et al., 2017). Recenti prove hanno dimostrato che oltre ai prodotti rameici, anche il caolino presenta una certa azione preventiva nei confronti dell'occhio di pavone, così come alcuni oli o estratti vegetali (Rongai et al., 2012).

In ogni caso la difesa contro la malattia viene prevalentemente condotta con l'utilizzo preventivo di formulati rameici distribuiti in primavera e/o in autunno, in corrispondenza della stagione di crescita del germoglio (Graniti, 1993).

Poiché l'infezione delle foglie si verifica durante i periodi piovosi e/o umidi, il successo della prevenzione dell'infezione con i fungicidi protettivi dipende in larga misura dalla tempestività degli interventi. Pertanto, il numero e la tempistica delle applicazioni fungicide possono variare notevolmente in base alle condizioni stagionali locali (Wilson & Miller, 1949).

La frequenza del trattamento dipende dalla persistenza del prodotto utilizzato e dalle condizioni stagionali. Negli ambienti olivicoli dell'Italia centrale, per tentare di razionalizzare la difesa si ritiene utile intervenire dopo la ripresa vegetativa, in coincidenza con la fase fenologica di mignolatura, sulla vegetazione primaverile di nuova formazione. In questa fase, però, l'utilizzo del rame deve essere molto oculato per non incorrere in possibili rallentamenti e contenimenti dello sviluppo vegetativo delle piante, soprattutto su alcune varietà particolarmente suscettibili alla fitotossicità del prodotto. Peraltro, in questi periodi non sono rari ritorni di freddo e/o forti escursioni termiche che potrebbero accentuare la fitotossicità da rame.

Per avere un'idea della pressione del fungo nell'oliveto si può ricorrere ad una diagnosi precoce sulla malattia, che può essere fatta immergendo un campione di foglie in soluzioni al 5% di idrossido di sodio o di potassio a temperature intorno ai 30° C per circa 10 minuti (Loprieno and Tenerini 1959).

Nel caso in cui si osservi la comparsa di macchie tonde sulla pagina superiore, le foglie sono infette. Nel caso in cui si arrivi al 30-40% di foglie infette e le condizioni ambientali (pioggia, umidità elevata, ecc.) siano favorevoli, c'è da presumere la possibilità di sviluppo di significative epidemie. Tuttavia, questa tecnica non può essere usata come metodo per posizionare gli interventi, che devono essere soprattutto preventivi (Cinquemani, 2021).

Le recenti disposizioni sull'uso di prodotti rameici in agricoltura e in tema di sostenibilità ambientale rendono ovviamente necessaria, anche in olivicoltura, una grande attenzione nell'effettuare i suddetti trattamenti rispettando i termini di legge.

Al rame viene attribuita, oltre alla ben nota attività preventiva, anche una funzione defogliante della vegetazione infetta legata a fenomeni di fitossicità (vedi sopra), che si verifica in seguito alla sua penetrazione nel mesofillo fogliare, proprio attraverso le lesioni della cuticola causate dal fungo. Ciò, permette di abbassare il potenziale di inoculo, determinando una parziale eradicazione della malattia (Bonifacio & Gudin, 1961).

Tuttavia, dopo ripetuti periodi di filloptosi e rigenerazione della chioma, gli alberi colpiti possono mostrare una crescita stentata e rese ridotte (Laviola, 1992; López Doncel et al., 2000) e se la presenza di *V. oleaginea* è consistente, la filloptosi eccessiva determina un indebolimento della pianta, la quale, non riuscendo a sostenere lo sviluppo dei frutti, va incontro ad una cascola precoce. Per questo motivo in alternativa ai prodotti rameici, per il trattamento di inizio primavera spesso si può essere utilizza la dodina.

Inoltre, a seguito della progressiva riduzione delle quantità di rame imposta dalla Commissione Europea si è rinnovato l'interesse nei confronti di molecole appartenenti alle strobilurine e ai triazoli, che per le loro caratteristiche citotropiche e sistemiche riescono a prevenire l'infezione del fungo, agendo fin dalle prime fasi dell'infezione.

Tra le molecole appartenenti alla prima categoria ricordiamo Azoxystrobin, Pyraclostrobin, Trifloxistrobina e il Kresoxim-metile, in grado di inibire la germinazione dei conidi a basse dosi d'impiego (Viruega et al., 2002); tra i triazoli, invece, abbiamo Difenconazolo e Tebuconazolo la cui attività fungicida si estrinseca a livello della biosintesi degli steroli alterando la funzionalità della cellula fungina (Fitogest, 2022).

La ricerca però non si è limitata alle sole sostanze chimiche: il ceppo QST713 di *Bacillus subtilis* ha, ad esempio, mostrato buona efficacia nei confronti della malattia sia in caso di media che di forte pressione, garantendo un buon contenimento del patogeno con applicazioni in pre-fioritura (Lasorella et al., 2022).

3.4 Complesso del Disseccamento Rapido dell'Olivo (CoDiRO)

Nel 2013, in alcune zone del Salento, fu rilevata sull'olivo una gravissima malattia, in grado di causare un rapido disseccamento delle piante, anche secolari e di grandi dimensioni. La malattia, denominata "sindrome del disseccamento rapido dell'olivo" (Olive Quick Decline Syndrome), determinava un repentino disseccamento delle varie branche della pianta portando rapidamente a morte l'intero soggetto (Figura 1d) e andando a rappresentare una grave minaccia per l'economia agricola e per le biodiversità locali (Saponari et al., 2019). Le prime segnalazioni da parte degli agricoltori risalgono agli anni compresi tra il 2008 e il 2010, ma solo nel 2013, in conseguenza dell'espandersi dei sintomi, il servizio fitosanitario locale decise di investigare in maniera più approfondita sull'eziologia della malattia. Inizialmente, i sintomi furono attribuiti ad attacchi di diversi agenti biotici, quali il *Colletotrichum* spp. o il marciume radicale associato a specie fungine come *Phaeoacremonium*, *Phemoniella*, *Pleumostomophora* e *Neofusicoccum*, oppure, in alternativa, ad errori nelle pratiche colturali, all'inquinamento o a fenomeni di fitotossicità.

Verso la fine del 2013, a seguito di un crescente aumento degli olivi che manifestavano i sintomi della sindrome, si arrivò a identificare il batterio responsabile *Xylella fastidiosa* Wells (Wells et al., 1987; Saponari et al., 2013; Saponari et al., 2019), un batterio asporigeno della famiglia Xanthomonadaceae, che risultava di nuova introduzione.

Questo primo focolaio confermato di questo patogeno esotico, che non era mai stato rilevato in nessun Paese dell'Unione Europea (UE), portò ad estendere le indagini alla vegetazione e alle specie vegetali limitrofe, alla ricerca soprattutto di piante che presentassero i tipici sintomi riscontrati sull'olivo. Nell'area circostante sono state così trovate anche altre specie vegetali infette, tra cui l'oleandro (*Nerium oleander*) e il mandorlo (*Prunus dulcis*), entrambi con sintomi di bruciatura fogliare e/o, nel caso dell'oleandro, di deperimento dei germogli.

Il ritrovamento di *X. fastidiosa* in questo nuovo ambiente, ma che infettava principalmente l'olivo, ha stimolato diversi programmi di ricerca incentrati sul patogeno e sul suo ruolo nello sviluppo dell'CoDiRo, sull'identificazione dei suoi vettori locali, sulla tassonomia del o dei genotipi batterici che ne andavano a comporre la popolazione e sui complessi fattori che contribuivano all'epidemiologia delle infezioni nell'area infetta della penisola salentina.

3.4.2 Agente causale e danni

Xylella fastidiosa Wells et al. (Xanthomonadaceae) è un batterio patogeno che è stato documentato in varie zone del mondo ed è caratterizzato da un'elevatissima variabilità genetica

e fenotipica, ed è in grado di infettare 638 specie vegetali. Sono oggi conosciute diverse sottospecie di *Xylella fastidiosa*, tra cui, ad esempio, la “*sandyi*” che predilige l'oleandro; la “*multiplex*” su pesco, olmo, susino; la “*pauca*”, su agrumi e caffè; la “*tashke*”, che colpisce la Chitalpa; la “*morus*” (sottospecie ricombinante di *X.f. multiplex* e *X.f. fastidiosa*) che infetta il gelso comune; e infine la “*fastidiosa*”, che predilige gli olivi, le viti e gli aceri (Sostizzo et al., 2018; Morelli et al., 2021). Si tratta di un batterio estremamente polifago e i sintomi associati alla sua presenza nelle piante variano ampiamente da infezioni non espresse alla morte della pianta in tempi limitati, a seconda della specie di pianta ospite, del livello di inoculo del batterio, della sottospecie coinvolta o delle condizioni climatiche.

Specialmente quando le infezioni sono a carico di piante agrarie, il patogeno può determinare danni economici rilevanti, come avviene ad esempio per la malattia di Pierce della vite (*Pierce's disease of grapevine*), il mal del pennacchio del pesco (*phony peach disease*), la clorosi variegata degli agrumi (*citrus variegated chlorosis*), la scottatura fogliare del susino (*plum leaf scald*), la bruscatura fogliare (*leaf scorch*) del mandorlo e del gelso, per finire proprio con la cosiddetta ‘sindrome del disseccamento rapido dell’olivo’ (*olive quick decline syndrome*).

L'indagine iniziale sulla genetica di *X. fastidiosa* che infetta gli olivi nel Salento ha indicato la presenza di un tipo di sequenza precedentemente non descritto, al quale è stato assegnato il conseguente codice identificativo ST53 (Elbeaino et al., 2014). ST53 ha un patrimonio genetico ben definito come sottospecie *pauca* (Nunney et al., 2014)

Presente in molte aree del Nord, del Centro e dell’America meridionale, il ceppo ST53 riscontrato in Italia sembra essere stato introdotto dalla Costa Rica in tempi relativamente recenti (Giampetruzzi et al., 2017), (Saponari et al. 2019). Oltre che in Puglia meridionale, esso è stato identificato anche in Francia (Provenza-Alpi-Costa Azzurra e Corsica), in Spagna (Isole Baleari e Madrid) e in Portogallo (Area metropolitana di Porto) (Morelli et al., 2021).

In Italia, inizialmente riscontrato su una superficie intorno ad 8000 ettari nella provincia di Lecce, oggi il patogeno si trova in buona parte delle province pugliesi (es. Bari, Barletta, Andria e Trani) andando a minacciare un’area intorno a 750 mila ettari di superficie, che vanta quasi un terzo della produzione olivicola nazionale. Dalla sua prima individuazione, *X. fastidiosa* sottospecie *pauca*, ceppo denominato "De Donno", ha infettato circa 4 milioni di alberi nell'area del focolaio (Schneider et al., 2020).

Nel 2018 è stato documentato un focolaio di *X. fastidiosa*, **appartenente alla sottospecie *multiplex***, nel comune di Monte Argentario, in provincia di Grosseto, che però non sembrerebbe danneggiare gli olivi (Morelli et al., 2021).

Su olivo gli attacchi colpiscono con particolare gravità gli esemplari più vecchi, con totale disseccamento degli ulivi secolari, mentre su piante più giovani l'alterazione si limita a disseccamenti terminali che raramente portano alla morte dell'intera pianta. Alcune cultivar sembrano mostrare una certa resistenza o tolleranza al patogeno (EFSA, 2019; Vos et al., 2019). In Puglia il batterio ha causato, e sta ancora causando, enormi perdite economiche di olivi e di produzione di olio, oltre a cambiamenti drammatici nel paesaggio mediterraneo, dove gli olivi sono una parte fortemente radicata del patrimonio culturale e un elemento importante della fiorente industria del turismo. Due anni dopo la sua scoperta in Puglia, *X. fastidiosa* è stata considerata non più eradicabile a causa dell'ampia presenza di piante infette nell'area del focolaio. Ciò ha indotto le autorità fitosanitarie nazionali ed europee a passare da una strategia di "eradicazione" a una di "contenimento" (European Commission, 2015).

Secondo stime recenti (documento conclusivo del 21 febbraio 2019 redatto dalla XIII Commissione Agricoltura della Camera sul diffondersi del patogeno nella regione pugliese) sembrerebbe che in Puglia *X. fastidiosa* abbia provocato danni già a quella data superiori a 1,6 miliardi di euro, compromettendo oltre 20 milioni di piante.

Se non si trovassero idonee strategie di lotta, la diffusione di questo batterio potrebbe pertanto mettere in ginocchio la produzione di olio in Italia, e a rischio l'intera olivicoltura nel Mediterraneo. Considerando il solo areale della Puglia, *X. fastidiosa* potrebbe provocare danni per oltre 5,2 miliardi di euro nei prossimi 50 anni se non si provvede a gestire l'epidemia con mezzi di lotta adeguati e a sostituire le piante infette (Schneider et al., 2020).

Questa rapidità di estensione e la conclamata alta polifagia del patogeno ne fa presagire una inquietante diffusione verso le altre regioni e un possibile ampliamento della platea di specie ospiti, con variazione nell'epidemiologia e nelle manifestazioni della sua patogenicità.

Relativamente all' olivo, potenzialmente, in uno scenario di piena diffusione nell'Unione europea, *Xylella fastidiosa* potrebbe causare una perdita di produzione annua di 5,5 miliardi di euro, colpendo il 70% del valore della produzione europea di olivi più vecchi (oltre 30 anni) e il 35% di quelli più giovani; l'11% degli agrumi; il 13% delle mandorle e tra l'1 e il 2% della produzione di uva. Ciò metterebbe a rischio quasi 300.000 posti di lavoro in tutta Europa attualmente coinvolti in queste produzioni. Oltre agli impatti diretti sulla produzione, il parassita potrebbe peraltro avere effetti indiretti significativi sui settori economici a monte o a valle della medesima (EFSA, n.d.).

3.4.3 Sintomatologia ed epidemiologia

Il batterio vive e si riproduce nei vasi xilematici delle piante, compromettendo il sistema di trasporto dell'acqua e determinando il rapido declino che dà il nome alla malattia (Figura 1d). Nelle piante infettate, si osserva la formazione di un biofilm batterico nello xilema, che combinato con le naturali risposte della pianta (formazione di tilosio e gomme) induce alla perdita di conduttività idraulica innescando le embolie che portano al disseccamento della pianta (Sabella et al., 2019).

I sintomi consistono nel disseccamento più o meno esteso del lembo fogliare (bruscatura), dapprima su rami isolati (a macchia di leopardo), poi su intere branche o sull'intera pianta, talora unito ad un ridotto accrescimento dei germogli e a un imbrunimento interno dei tessuti legnosi nei giovani rami, nelle branche e nel fusto. Spesso la malattia appare come un complesso di sintomi, con l'intervento anche di vari altri agenti fungini o di insetti. Tuttavia, soprattutto nelle piante più vecchie, il ruolo svolto dagli altri fattori è pressoché sempre marginale.

La diffusione del patogeno da una pianta malata ad una sana è risultata connessa a insetti emitteri che si nutrono succhiando la linfa dei vasi xilematici, prevalentemente le cosiddette "sputacchine", in particolare la specie *Philaenus spumarius* L., nota come sputacchina media", specie estremamente polifaga e molto diffusa in Italia e in Europa. (Saponari et al., 2014; Vos et al., 2019).

Il periodo di incubazione, ossia il tempo che intercorre tra l'inoculazione e la comparsa di sintomi, è altamente variabile e varia da pochi mesi ad anni, a seconda della specie ospite, lo stadio fisiologico (età) della pianta e le relative condizioni di crescita (EFSA, 2018).

3.4.4 *Philaenus spumarius*, vettore della *Xylella fastidiosa*

Le indagini sui potenziali insetti vettori di *X. fastidiosa* in Europa e nei paesi del Mediterraneo hanno identificato in modo inequivocabile le sputacchine (Hemiptera: Aphrophoridae) (Bodino et al., 2020), il cui nome comune deriva dalla schiuma bianca in cui vivono immersi gli stadi giovanili.

Attualmente, gli unici vettori confermati di *X. fastidiosa* in Europa sono *P. spumarius* (Hemiptera: Aphrophoridae) e, in condizioni sperimentali, *Neophilaenus campestris* Fallén (presente soprattutto in Europa occidentale e infedato su piante erbacee) e *Philaenus italosignus* Drosopolous e Remane (specie endemica in Italia, con presenza ristretta all'Italia meridionale e alla Sicilia) (EFSA, 2019). Risulterebbe pertanto che la specie *Philaenus spumarius* L., nota come "sputacchina media", molto diffusa in Europa (Saponari et al., 2014),

rivesta un ruolo epidemiologico cruciale nella diffusione del patogeno, in quanto molto abbondante, sia sulla vegetazione spontanea sia sull'olivo (Cornara et al., 2017).

La gestione complessiva del vettore è pertanto essenziale per il controllo della diffusione della *Xylella*, tanto da aver indotto la Commissione Europea a imporre interventi di lotta obbligatori contro l' insetto (European Parliament, 2016).

Prima della comparsa di *X. fastidiosa* in Europa, queste specie di insetti erano trascurate e poco studiate, poiché non erano mai state associate a danni diretti significativi alle colture. Oggi, a causa del loro ruolo primario come vettori europei di *X. fastidiosa*, hanno guadagnato grande attenzione da parte della comunità scientifica. I risultati di numerosi studi sono ora disponibili e rivelano informazioni rilevanti sulla loro biologia ed ecologia e forniscono importanti indicazioni per implementare strategie di controllo efficaci (Bodino et al., 2021).

3.4.4.1 Morfologia e ciclo biologico

Gli insetti del genere *Philaenus* sono Rincoti Omotteri della famiglia delle Afroforidae, i cui adulti, lunghi 5,5-6,5 mm, hanno forma ovoidale e un colore che va dal color crema fino al bruno scuro, con un capo angoloso, più largo che lungo. Essi si nutrono succhiando linfa dai vasi linfatici delle piante attraverso il loro apparato boccale pungente-succhiante. Il batterio presente nella pianta infetta si trasmette così all'insetto e in questo viene conservato, per tutta la sua vita, nel relativo apparato digerente. Quando il vettore va a nutrirsi su piante sane, trasmette a queste il batterio. Da qui l'esplosione degli attacchi nelle aree infette. Ma tali insetti possono svolgere un pericoloso ruolo anche nella diffusione spaziale del patogeno: sebbene volino solo per un centinaio di metri o poco più, sfruttando i venti o meglio, casualmente trasportati insieme all'erba, essi possono essere causa di diffusione del batterio anche a chilometri di distanza, mettendo nel tempo praticamente a rischio ogni zona olivicola.

P. spumarius compie una sola generazione l'anno, sverna allo stadio di uovo e compie un ciclo di sviluppo che comprende cinque stadi pre-immaginali prima della comparsa degli adulti. Le uova vengono deposte per lo più al colletto o sui culmi di graminacee, riparate fra internodo e guaina della foglia. Stoppie e residui vegetali sono siti di ovodeposizione preferiti (Weaver & King, 1954; Saponari et al., 2014).

In Italia meridionale gli stadi giovanili compaiono intorno alla metà di marzo, con un picco nel numero di individui registrato intorno alla metà di aprile, sono poco mobili, dal colore chiaro e tinta uniforme, con occhi scuri, riparati da schiuma bianca. Essi completano lo sviluppo in 5-7 settimane e a partire da aprile si possono osservare i primi adulti.

Si tratta di un insetto estremamente polifago, con neanidi e ninfe che si alimentano su piante erbacee appartenenti alla famiglia delle Asteraceae, delle Fabiaceae e delle Apiaceae, sia spontanee che coltivate.

In Italia settentrionale e meridionale sono stati osservati spostamenti stagionali di adulti dalla vegetazione erbacea alle chiome degli olivi e di altri alberi e arbusti sempreverdi o decidui nel periodo tarda primavera-inizio dell'estate (Bodino et al., 2017; Cornara et al., 2018). Questo movimento può essere osservato anche quando la copertura erbacea persiste durante l'estate, e quindi probabilmente è dovuta alla preferenza delle forme adulte a nutrirsi su piante arboree (Vos et al., 2019). Alla fine dell'estate e all'inizio dell'autunno, le femmine adulte tornano alla vegetazione erbacea per l'ovodeposizione (Cornara et al., 2018).

Le condizioni climatiche possono influenzare il ciclo di vita di questo insetto, per cui il calendario della sorveglianza dei vettori dovrebbe essere adattato di conseguenza. In Puglia, la comparsa degli adulti di *P. spumarius* avviene solitamente tra la fine di aprile e l'inizio di maggio, con il massimo della popolazione di adulti presente tra la fine della primavera e l'inizio dell'estate.

3.4.4.2 Trasmissione dell'agente eziologico

Gli adulti acquisiscono *X. fastidiosa* nutrendosi nello xilema dell'ospite infetto. Il batterio viene trasmesso dall'insetto vettore senza un periodo di latenza dopo l'acquisizione e in modo persistente per tutta la durata vitale, ossia da maggio fino a ottobre (R. P. P. Almeida et al., 2005). Ciò mette in discussione l'efficacia della lotta chimica per proteggere le piante dalle infezioni durante l'intera stagione degli adulti (Vos et al., 2019). Le ninfe, al contrario degli adulti, hanno una capacità di movimento limitata e, negli attuali scenari epidemiologici dei focolai europei, non contribuiscono alla diffusione delle infezioni (Cornara et al., 2018). Inoltre, nell'insetto i batteri restano limitati al canale alimentare e non colonizzano il resto del corpo in maniera sistemica. Aderiscono e si moltiplicano in parti dell'intestino quali il *precibarium* e il *cibarium*; ciò implica che i vettori perdono infettività con la muta, in quanto durante questa fase l'intestino si rinnova. Pertanto, gli adulti appena emersi devono acquisire nuovamente *X. fastidiosa* per diventare infettivi e diffonderla.

Il batterio non viene trasmesso per via transovarica alla progenie del vettore (Saponari et al., 2014). Gli adulti alati, a causa della loro elevata mobilità e della loro infezione persistente, sono in definitiva i principali responsabili della diffusione del patogeno. La trasmissione di *X. fastidiosa* a nuove piante ospiti avviene, tuttavia, anche in presenza di pochissime cellule batteriche vive nell'intestino del vettore (Vos et al., 2019). L'efficienza della trasmissione varia

sostanzialmente a seconda della specie di insetto, della pianta ospite e del genotipo del batterio (EFSA, 2019).

I risultati di indagini condotte in oliveti italiani infetti hanno confermato che le sputacchine positive a *X. fastidiosa* vengono rilevate subito dopo la comparsa degli adulti, all'inizio di maggio, con un'incidenza che aumenta nel corso della stagione; pertanto, per una strategia di controllo efficace e sostenibile, è necessario agire nella fase iniziale della stagione, con l'obiettivo di ridurre il più possibile il numero di adulti che visitano le chiome degli olivi infetti (Morelli et al., 2021).

Nonostante *P. spumarius* non è sia un vettore molto efficiente se paragonato ad altri, il livello di popolazione e la preferenza per le piante di olivo ne compensano la bassa efficienza (Bodino et al., 2021). Ciò rende ancora più importante ridurre notevolmente le popolazioni di questo insetto negli oliveti, preferibilmente allo stadio ninfale, poiché il numero di insetti che si nutrono è probabilmente il fattore più importante che determina il successo della trasmissione e la rapida diffusione del patogeno.

3.4.4 Strategie di difesa: controllo di *Xylella fastidiosa* e del vettore *Philaenus spumarius*

A causa della sua spiccata dannosità, *X. Fastidiosa* è un organismo classificato come "patogeno da quarantena" nella lista A1 della *European and Mediterranean Plant Protection Organization* (EPPO) fin dal 1981. In base alla direttiva europea 2000/29/CE, a causa della letalità con cui colpisce le piante ogni segnalazione della sua presenza sul territorio della Comunità europea obbliga lo stato membro all'adozione di drastiche misure di contenimento ed eradicazione.

Per la preoccupante espansione dei focolai di *Xylella* sugli uliveti del Salento, sin dal 2014 vennero progressivamente messe in atto delle misure fitosanitarie di contenimento ed eradicazione che prevedevano la distruzione delle piante colpite nelle superfici interessate, e degli interventi finanziari destinati a contrastare il parassita ed a sostenere gli imprenditori del settore nei territori interessati (Saponari et al., 2019).

Tuttavia, l'enorme sviluppo dei focolai e l'espansione del batterio in una quindicina di specie vegetali diverse hanno reso non più raggiungibile l'obiettivo di eradicazione. Furono allora messe in atto particolari misure per ridurre i focolai d'infezione, che prevedevano l'istituzione di "fasce di contenimento" e delle "buffer zone" in prossimità delle zone infette. In queste aree, dell'ampiezza rispettivamente di 20 km e 10 km, sono state attuate misure di ispezione, campionamento, controllo e rimozione delle piante infette, sia olivi che ospiti secondari, con controllo dei vettori. Queste zone sono state differenziate per intensità delle misure di

estirpazione delle piante malate e, in via precauzionale, di quelle sane che si trovino a una certa prossimità con i focolai (Saponari et al., 2019).

Tuttavia, non esiste a tutt'ora un mezzo esaustivo per combattere direttamente *X. Fastidiosa*, nonostante i ricercatori abbiano prodotto una crescente letteratura sui tentativi di controllare il patogeno attraverso l'applicazione di diversi trattamenti (Baldassarre et al., 2020).

I vari studi sull'argomento si sono basati su diversi approcci di controllo, che a loro volta coinvolgono formulazioni minerali, composti chimici, prodotti naturali e antagonisti microbici. A tal proposito, sembrerebbe che il contenuto relativo di elementi minerali presenti in uno specifico tessuto (Salt et al., 2008), possa interferire con l'espressione dei sintomi causati dal ceppo di *X. fastidiosa* nell'olivo, le stesse caratteristiche di resistenza riscontrate nella cultivar Leccino derivano dagli elevati contenuti di calcio e manganese (D'Attoma et al., 2019).

Basandosi su questi presupposti sono stati studiati trattamenti con diverse combinazioni di molecole, tra cui Dentamet®, un biocomplesso di zinco-rame-acido citrico (Del Coco et al., 2020), cloruro d'ammonio (Dongiovanni et al., 2021) e N-acetilcisteina (NAC) (Alves de Souza et al., 2019).

Altri approcci per ridurre *X. fastidiosa* hanno coinvolto nanocristalli di fosetil-alluminio rivestiti di chitosano (Baldassarre et al., 2020) e peptidi antimicrobici (AMP) (Baro et al., 2020), ma finora queste soluzioni minerali non hanno portato a un controllo efficace del batterio in pianta.

Sono stati esplorati anche gli effetti di prodotti di origine vegetale o microbica nei confronti del batterio, in particolare le classi di composti fenologici, gli estratti di colture di *Trichoderma* spp. e tossine fungine (Morelli et al., 2021). Tutti i composti fenolici testati hanno mostrato una certa attività inibitoria nei confronti del ceppo di *X. fastidiosa* presente nelle piante di olivo, anche se limitata a effetti batteriostatici reversibili. In particolare, catecolo, acido caffeico e resveratrolo hanno mostrato il più alto potenziale inibitorio nei confronti del patogeno (Maddox et al., 2020).

Le specie di olivo presentano un'ampia variabilità genetica e fenotipica (più di 900 cultivar) nell'area mediterranea: ciò ha permesso di individuare fin dal principio che alcune cultivar, come Ogliarola salentina e Cellina di Nardò, erano altamente suscettibili a *X. fastidiosa*, mentre tratti di resistenza sono stati riscontrati nella cultivar Leccino, dove si è osservata una minore incidenza di infezioni e limitati disseccamenti della chioma (Mazzalupo et al., 2009).

Ulteriori tratti di resistenza sono stati individuati nella cultivar FS17®, e caratterizzati sia da un contenimento della popolazione batterica che da limitati disseccamenti (Boscia et al., 2017). Diverse altre cultivar di olivo sono attualmente in fase di valutazione per quanto riguarda la

suscettibilità alle infezioni in campo o in condizioni artificiali nell'ambito del progetto XF-ACTORS. Nonostante i benefici epidemiologici dovuti a una riduzione dell'acquisizione e della trasmissione del batterio da parte di *P. spumarius* quando acquisito da varietà resistenti, mancano studi a lungo termine sulla stabilità della resistenza e sulla resa di queste particolari cultivar (Morelli et al., 2021).

È attualmente in corso uno studio per valutare l'innesto di Leccino sulle cultivar suscettibili Ogliarola salentina e Cellina di Nardò per salvare gli alberi centenari nell'ambito del Progetto ResiXO, finanziato dalla Regione Puglia. Nell'ambito dello stesso progetto, sono state selezionate piantine di olivo cresciute naturalmente nell'area epidemica, perseguendo anche in questo caso una strategia di selezione della resistenza alla convivenza con il batterio.

La resistenza di Leccino in campo è stata confermata da ulteriori studi che hanno riportato una composizione ionomerica diversa rispetto all'Ogliarola salentina (D'Attoma et al., 2019).

Il meccanismo di resistenza di alcune varietà sembrerebbe inoltre risiedere nella capacità di ripristinare la conduttività idraulica dello xilema, oltre che nella minore predisposizione anatomica di questo a subire fenomeni di cavitazione (Sabella et al., 2019).

Altre ricerche hanno pensato di associare le differenze tra varietà suscettibili e tolleranti alla malattia con il microbioma della pianta (Mitter et al., 2019).

Infatti, è stata osservata un'importante disbiosi determinata dall'infezione di *X. fastidiosa* nella cultivar Cellina di Nardò, suscettibile, che non è stata riscontrata invece nella cultivar Leccino, resistente, le cui comunità microbiche hanno mostrato una maggiore diversità (Vergine et al., 2020).

La tendenza del microbioma endofitico a soccombere all'occupazione dell'intera nicchia ecologica da parte di *X. Fastidiosa*, con il progredire dell'infezione è stata confermata anche da studi successivi che hanno riscontrato come questa tendenza fosse più evidente nella cultivar suscettibile Kalamata rispetto alla resistente FS-17® (Giampetruzzi et al., 2020).

Sebbene siano state osservate differenze nei microbiomi delle cultivar suscettibili e resistenti, quando si è valutata la capacità di biocontrollo di alcuni ceppi batterici endofiti isolati da olivi situati nell'area infetta, nessuno di essi si è dimostrato efficace nell'inibire la crescita di *Xylella fastidiosa* (Zicca et al., 2020).

Ciò premesso, mentre per i nuovi impianti è auspicabile l'utilizzo di varietà tolleranti, negli impianti in essere, l'unica soluzione generalizzabile è rappresentata dalla lotta agli insetti vettori.

Oggi la riduzione della popolazione di sputacchine può essere attuata attraverso una strategia efficace di gestione integrata, che deve essere necessariamente mirata a ridurre la popolazione di *P. spumarius* durante gli stadi pre-immaginali, minimizzando il numero di adulti vettori.

Una lavorazione del terreno eseguita due volte nell'annata, all'inizio dell'inverno e in primavera, una lavorazione del terreno durante l'inverno, arature poco profonde, la pacciamatura e il pirodiserbo sono tecniche in grado di ridurre significativamente gli stadi giovanili di *P. spumarius*, anche se con una persistenza limitata, mentre l'applicazione di erbicidi chimici ha mostrato un effetto più lento ma una maggiore persistenza (Dongiovanni et al., 2018).

Sebbene la scarsa conoscenza dei potenziali nemici naturali ostacoli l'efficace implementazione delle misure di controllo biologico attraverso questi, negli ultimi anni in Europa sono state intensificate le indagini sui nemici naturali delle sputacchine, tuttavia, i dati relativi a queste interazioni sono preliminari e sono necessari ulteriori studi per comprendere appieno il grado di specificità parassitoide-preda, al fine di evitare effetti non bersaglio associati a qualsiasi misura di biocontrollo aumentativo (Morelli et al., 2021).

In maniera limitata, sono stati effettuati anche tentativi di ridurre gli eventi di trasmissione negli oliveti. In particolare, è stata valutata l'efficacia del caolino in una nuova piantagione di olivi nell'area infetta da *X. fastidiosa*, per valutarne l'impatto come potenziale repellente, tuttavia senza risultati soddisfacenti ed evidenziando ulteriormente la difficoltà di trovare un controllo efficace per gli adulti, rafforzando la necessità di mettere in atto misure per il controllo delle forme giovanili (Dongiovanni et al., 2020).

Nell'ambito della messa a punto di misure di controllo da includere nelle strategie di gestione integrata, alcuni studi hanno esaminato l'effetto della manipolazione del comportamento alimentare e sessuale di *P. spumarius*. Sebbene i feromoni non siano comuni nelle sputacchine e sia improbabile il loro utilizzo in sistemi di monitoraggio e controllo, recenti studi sulla struttura e sulla funzionalità delle antenne della sputacchina hanno permesso di identificare i chemorecettori e la capacità dei sistemi olfattivi maschili e femminili di percepire composti volatili che potrebbero modulare le interazioni intraspecifiche dell'insetto (Ranieri et al., 2016; Germinara et al., 2017; Ganassi et al., 2020). Tali effetti devono ancora essere confermati in condizioni di campo, ma aprono la strada a strategie di controllo basate su sostanze semiochimiche (Morelli et al., 2021).

Per quanto riguarda la manipolazione del comportamento sessuale, sono in corso studi per caratterizzare l'emissione di segnali vibrazionali da parte di maschi e femmine. Sono però necessarie anche in questo caso ulteriori ricerche per identificare un segnale efficace e la strategia più adatta per l'applicazione sul campo (Avosani et al., 2021).

Come descritto all’inizio del presente paragrafo, a causa dell’estrema pericolosità del batterio e a seguito della sua inclusione nella lista dei patogeni da quarantena da parte dell’Unione Europea è stato necessario mettere in atto una serie di misure legislative volte al contenimento di *X. fastidiosa* e del suo vettore *P. spumarius*. A tal proposito, viene redatto uno specifico piano di azione annuale per la regione Puglia che riunisce tutte le misure da attuare obbligatoriamente per il contenimento del patogeno (Regione Puglia, 2022).

Gli obiettivi del piano sono: a) l’eradicazione dell’organismo nocivo e il contenimento della diffusione per tutelare le aree indenni regionali, evitando che la malattia si diffonda nel resto del territorio dell’Unione Europea; b) la prevenzione della diffusione dell’organismo nocivo mediante la riduzione della popolazione dei vettori; c) il potenziamento della campagna di comunicazione e informazione. Ciò viene attuato attraverso le dieci misure specifiche e la timeline riportate nella in figura 2.

Attività	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.
1. Sorveglianza aree delimitate										
2. Sorveglianza area indenne										
3. Sorveglianza a seguito di rinvenimento di pianta infetta										
4. Rimozione delle piante										
5. Sorveglianza fitosanitaria ai sensi della l.r. 4 del 2017 e s.m.i.										
6. Monitoraggio vettori										
7. Strategia di controllo dei vettori										
8. Controlli ufficiali										
9. Comunicazione										
10. Ricerca e collaudo delle innovazioni										

Figura 1: Misure specifiche per il contenimento del patogeno da quarantena *Xylella fastidiosa* durante i vari mesi dell’anno (Da Regione Puglia, 2022).

Nel documento sono riportate le specifiche zone delimitate, suddivise a loro volta in zone infette e zone cuscinetto.

Per contrastare il vettore *P. spumarius*, in tutte le aree delimitate, le misure fitosanitarie obbligatorie impongono una lavorazione superficiale del terreno la cui tempistica è definita in base all’altitudine in cui si trova l’oliveto (es. per oliveti fino a 200 m di altitudine va effettuata dal 10 marzo al 10 aprile).

A seguire, vanno eseguiti almeno due trattamenti fitosanitari che sono obbligatori nelle zone delimitate e fortemente consigliati nelle aree indenni.

Il monitoraggio degli individui adulti viene attuato con lo scopo di identificare il periodo in cui essi si muovono dalla vegetazione erbacea verso le chiome delle piante, dove possono

potenzialmente acquisire il batterio e contribuire alla sua successiva diffusione. Per questa ragione è opportuno che i trattamenti per il controllo degli adulti di *P. spumarius* siano effettuati prima che essi possano aver acquisito il batterio, al fine di ridurre quanto più possibile la popolazione di vettori che diviene potenzialmente infettiva.

L'intervallo tra le applicazioni è di circa 20-25 giorni. Il primo trattamento ha lo scopo di ridurre quanto più possibile la popolazione degli adulti prima che acquisiscano il batterio; il secondo ha lo scopo di abbattere ulteriormente la popolazione degli adulti che non sia stata interessata dall' intervento precedente. Ad oggi le molecole autorizzate per l'utilizzo su olivo sono Acetamiprid, Fosmet, Spinetoram, Deltametrina e Flupyradifurone.

Indicazioni precise sul momento ottimale per l'esecuzione del trattamento vengono fornite puntualmente agli agricoltori attraverso un sistema di bollettini fitosanitari.

Il Consiglio regionale della Regione Puglia, con la legge regionale 29 marzo 2017 n. 4 e s.m.i "Gestione della batteriosi da *Xylella fastidiosa* nel territorio della Regione Puglia", ha espresso la volontà di attuare le misure fitosanitarie necessarie per contrastare la diffusione di *Xylella fastidiosa* tutelando al contempo l'inestimabile patrimonio naturale costituito dagli olivi monumentali. Per fare ciò sono state attuate specifiche misure di sorveglianza fitosanitaria programmata entro un'area compresa tra i 5 e 20 km dal confine meridionale delle zone infette e specifiche misure di monitoraggio dei vettori in siti "sentinella", allo scopo di impostare una strategia di controllo e valutare l'efficacia delle misure fitosanitarie adottate nel ridurre il rischio della diffusione del batterio patogeno.

A tal fine, risultano importanti anche i controlli ufficiali eseguiti nei vivai, nei punti di ingresso e sulla movimentazione delle specie oggetto d'interesse, nonché sull'applicazione delle corrette misure fitosanitarie di controllo dei vettori.

L'esperienza maturata in Puglia dal 2013 ad oggi ha evidenziato uno specifico bisogno di servizi avanzati e di ricerca per supportare gli olivicoltori nell'affrontare l'emergenza fitosanitaria causata da *Xylella fastidiosa*.

Per promuovere l'adozione di comportamenti sfavorevoli al propagarsi del batterio, nel piano d'azione annuale è prevista la realizzazione di un piano di informazione e comunicazione, con costante e stretta collaborazione con le amministrazioni locali, altri enti e organizzazioni di rappresentanza del mondo agricolo per l'attuazione delle misure obbligatorie di lotta al vettore ed i relativi controlli.

La Regione Puglia e l'Unione Europea hanno investito importanti risorse per l'attività di sorveglianza. Riuscire a capire come migliorarne la qualità di tale sorveglianza assume quindi

rilevanza strategica per contrastare la diffusione del batterio agente causale del complesso del disseccamento rapido dell'olivo.

Per fare ciò, è imprescindibile il controllo dei vettori e la conoscenza dei meccanismi di interazione che essi hanno con piante e paesaggio, in modo da acquisire quelle informazioni indispensabili per valutare il rischio fitosanitario nel territorio e per delineare le aree a maggiore rischio.

A tal proposito, nella lotta contro *P. spumarius* e, indirettamente, contro *X. fastidiosa*, potrebbe essere rilevante il ruolo di opportuni Sistemi di Supporto Decisionale in grado di guidare nella definizione della soglia di intervento e quindi del momento ottimale dell'intervento di difesa.

3.5 Bibliografia

Agosteo, G. E. (2010). Avversità dell'olivo ed evoluzione dei relativi sistemi di difesa in Calabria fra XVIII e XX secolo (pp. 41–47).

Agosteo, G. E., Cacciola, S. O., Magnano Di San Lio, G., & Pane, A. (2008). Le malattie dell'olivo. In *La Sicilia dell'olio*. Giuseppe Maimone Editore.

Agosteo, G. E., Cacciola, S. O., Pane, A., & Frisullo, S. (1997). Vegetative compatibility groups of *Colletotrichum acutatum* species complex from olive in Italy. 10th Congress of the Mediterranean Phytopathological Union, 95–99.

Agosteo, G. E., Macrì, C., Faedda, R., Pennisi, A. M., Cacciola, S. O., & Magnano di San Lio, G. (2003). Epidemic outbreaks of olive anthracnose in Central Italy. *Journal of Plant Pathology*, 85(280).

Agosteo, G. E., Macrì, C., & Taccone, P. (2005). Susceptibility of olive cv Itrana to anthracnose. *Journal of Plant Pathology*, 87(4), 287.

Agosteo, G. E., & Pennisi, A. M. (1994). Confronto tra isolati di *Colletotrichum acutatum* species complex ottenuti da olivo e da agrumi in Calabria. *Micologia Italiana*, 23, 76–80.

Agosteo, G. E., Scolaro, L., & Previtiera, G. (2007). Non-conventional chemical control of olive anthracnose. *Integrated protection of olive crops*. IOBC/WPRS Bulletin, 30, 245–248.

Agosteo, G. E., & Zappia, R. (2007). Epidemiological study of olive scab in Calabria. *IOBC/WPRS Bulletin*, 30, 233–244.

Alfei, B., Pannelli, G., & Ricci, A. (2016). *Olivicoltura: Coltivazione, olio e territorio*. Edagricole.

- Almeida, R. P. P., Blua, M. J., Lopes, J. R., & Purcell, A. H. (2005). Vector transmission of *Xylella fastidiosa*: applying fundamental knowledge to generate disease management strategies. *Annals of the Entomological Society of America*, 98, 775–786.
- Alves de Souza, A., Coletta-Filho, H.D. Dongiovanni, C., & Saponari, M. (2019). N-acetylcysteine for controlling *Xylella fastidiosa* in citrus and olive: Understanding the differences to improve management. 2nd European Conference on *Xylella Fastidiosa*: How Research Can Support Solutions, 42–43.
- Andreucci, E., & Bonifacio, A. (1969). Ricerche su *Cycloconium oleaginum* in alcune zone della Toscana Settentrionale. *Phytopathologia Mediterranea*, 1(4), 141–151.
- Angelini, R., Pisante, M., Inglese, P., & Lercker, G. (2009). L'ulivo e l'olio. In *Coltura&Cultura*. Bayer CropScience.
- Anselmi, A., Caruso, G., Cola, G., Gucci, R., Meriggi, P., Rossi, V., Sandali, P., Scaramozzino, N., & Servili, M. (2017). Un sistema di supporto alla gestione dell'oliveto. *Olivo e Olio*, 5, 28–32.
- Avosani, S., Franceschi, P., Ciolli, M., Verrastro, V., & Mazzoni, V. (2021). Vibrational playbacks and microscopy to study the signalling behaviour and female physiology of *Philaenus spumarius*. *Journal of Applied Entomology*, 145, 518–529.
- Aylor, D. E. (1995). Vertical variation of aerial concentration of *Venturia inaequalis* ascospores in an apple orchard. In *Phytopathology* (Vol. 85, Issue 2, pp. 175–181). <https://doi.org/10.1094/Phyto-85-175>
- Aylor, D. E., & Sanogo, S. (1997). Germinability of *Venturia inaequalis* conidia exposed to sunlight. *Phytopathology*, 87(6), 628–633. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1997.87.6.628>
- Baldassarre, F., Tatulli, G., Vergaro, V., Mariano, S., Scala, V., Nobile, C., Pucci, N., Dini, L., Loreti, S., & Ciccarella, G. (2020). Sonication- assisted production of fosetyl-al nanocrystals: Investigation of Human toxicity and in vitro antibacterial efficacy against *Xylella fastidiosa*. *Nanomaterials*, 10(1174).
- Ballio, A., Bottalico, A., Buonocore, V., Carilli, A., Di Vittorio, V., & Graniti, A. (1969). Production and isolation of aspergillomarasin B (lycomarasmic acid) from cultures of *Colletotrichum gloeosporioides* Penz. (*Gloeosporium olivarum* Aim.). *Phytopathologia Mediterranea*, 8(3), 187–196.

- Baro, A., Badosa, E., Montesinos, L., Feliu, L., Planas, M., Montesinos, E., & Bonaterra, A. (2020). Screening and identification of BP100 peptide conjugates active against *Xylella fastidiosa* using a viability-qPCR method. *BMC Microbiology*, 20(229).
- Becker, C. M., & Burr, T. J. (1993). Discontinuous wetting and survival of conidia of *Venturia inaequalis* on apple scab..pdf. *Phytopathology*, 372–378.
- Bodino, N., Cavalieri, V., Dongiovanni, C., Saladini, M. A., Simonetto, A., Volani, S., Plazio, E., Altamura, G., Tauro, D., & Gilioli, G. (2020). Spittlebugs of Mediterranean olive groves: Host-plant exploitation throughout the year. *Insects*, 11(130).
- Bodino, N., Cavalieri, V., Pegoraro, M., Altamura, G., Canuto, F., Zicca, S., Fumarola, G., Almeida, R., Saponari, M., Dongiovanni, C., & Bosco, D. (2021). Temporal dynamics of the transmission of *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* by *Philaenus spumarius* to olive plants. *Entomologia Generalis*, 41(5), 463–480.
- Bodino, N., Plazio, E., Picciau, L., Dongiovanni, E. C. V., Di Carolo, M., Tauro, D., Volani, S., Salerno, M., Russo, V., Porcelli, F., Gilioli, G., & Bosco, D. (2017). Phenology population dynamics and host plants of *Philaenus spumarius* in Italian olive groves. *European Conference on Xylella 2017. Finding Answers to a Global Problem.*, 19.
- Bonifacio, A., & Gudin, C. (1961). Comparison of some fungicides for their defoliating activity on Cycloconium-affected olive leaves. *Rivista Di Patologia Vegetale*, 3(1), 107–113.
- Boscia, D., Altamura, G., Ciniero, A., Di Carolo, M., Dongiovanni, C., Fumarola, G.; Giampetruzzi, A., Greco, P., La Notte, P., & Loconsole, G. (2017). Resistenza a *Xylella fastidiosa* in diverse cultivar di olivo. *L'Informatore Agrario*, 11, 56–59.
- Cacciola, S. O., Agosteo, G. E., Faedda, R., Frisullo, S., & Magnano di San Lio, G. (2007). Characterization of *Colletotrichum* species causing olive anthracnose in Italy. *IOBC/WPRS Bulletin*, 30(9), 229.
- Cacciola, S. O., Agosteo, G. E., Frisullo, S., Faedda, R., & Magnano di San Lio, G. (2001). Characterization of the causal agent of olive anthracnose using RAPD-PCR. 11th Congress of the Mediterranean Phytopathological Union and 3rd Congress of the Sociedade Portuguesa de Fitopatologia, 190–193.
- Cacciola, S. O., Agosteo, G. E., Pane, A., & Magnano di San Lio, G. (1996). Osservazioni sull'epidemiologia dell'antracnosi dell'olivo in Calabria. *Informatore Fitopatologico*, 46(6), 27–32.

- Cacciola, S. O., Faedda, R., Sinatra, F., Agosteo, G. E., Schena, L., Frisullo, S., & Magnano di San Lio, G. (2012). Olive Anthracnose. *Journal of Plant Pathology*, 94(1), 29–44.
- Castellani, E. (1952). Osservazioni e ricerche sull'occhio di pavone in Sardegna. *Olearia*, 6, 154–161.
- Chen, S., & Zhang, J. (1983). Studies on olive peacock's eye disease, infection cycle and epidemiology. *Phytopathologica Sinica*, 13, 31–40.
- Ciccarone, A. (1950). Considerazioni biologiche e sistematiche sull'agente della "lebbra" delle olive, recentemente osservata nel Leccese. *Bollettino Della Regia Stazione Di Patologia Vegetale Di Roma*, 3(5), 143–165.
- Cinquemani, T. (2021). Olivo, ecco come usare la dodina contro l'occhio di pavone. *Agronotizie*. <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/difesa-e-diserbo/2021/12/27/olivo-ecco-come-usare-la-dodina-contro-l-occhio-di-pavone/73560>
- Cornara, D., Bosco, D., & Fereres, A. (2018). *Philaenus spumarius*: when an old acquaintance becomes a new threat to European agriculture. *Journal of Pest Science*, 91(3), 957–972. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0966-0>
- Cornara, D., Saponari, M., Zeilinger, A. R., de Stradis, A., Boscia, D., Loconsole, G., Martelli, G., Almeida, R. P. P., & Porcelli, F. (2017). Spittlebugs as vectors of *Xylella fastidiosa* in olive orchards in Italy. *Journal of Pest Science*, 90(2), 521–530.
- Cristinzio, G., Testa, A., Bosso, L., & Mastroianni, G. (2011). Sensibilità di quattro cultivar di olivo alla *Venturia oleaginea* (Cast.) Hugh. in provincia di Caserta. *Acta Italus Hortus*, 1, 362–365.
- Damm U, Cannon PF, Woudenberg JH, Crous PW. The *Colletotrichum acutatum* species complex. *Stud Mycol*. 2012 Sep 15;73(1):37-113. doi: 10.3114/sim0010. Epub 2012 Aug 22. PMID: 23136458; PMCID: PMC3458416.
- D'ascenzo, D., Crivelli, L., & Di Camillo, L. (2014). Nuove strategie di difesa nei confronti del cicloconio dell'olivo nell'Italia centrale. *Atti Giornate Fitopatologiche Vol. 2*, 139–146.
- D'Attoma, G., Morelli, M., Saldarelli, P., Saponari, M., Giampetruzzi, A., Boscia, D., Savino, V. N., De La Fuente, L., & Cobine, P. A. (2019). Ionomic differences between susceptible and resistant olive cultivars infected by *Xylella fastidiosa* in the outbreak area of salento, Italy. *Pathogens*, 8(272).

- de Almeida, M. J. V. (1899). La gaffa des olives en Portugal. *Bulletin de La Société Mycologique de France*, 15, 90–94.
- De Marzo, L., Frisullo, S., Lops, F., & Rossi, V. (1993). Possible dissemination of *Spilocaea oleagina* conidia by insects (*Ectopsocus briggsi*). *Bulletin OEPP/EPPO*, 23, 389–391.
- de Wit, C. T. (1993). Philosophy and terminology. In P. A. Leffelaar (Ed.), *On Systems Analysis and Simulation of Ecological Processes* (pp. 3–9). Springer-Science + Business Media Dordrecht.
- Del Coco, L. D., Migoni, D., Girelli, C. R., Angilè, F., Scortichini, M., & Fanizzi, F. P. (2020). Soil and leaf ionomer heterogeneity in *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*-infected, non-infected and treated olive groves in Apulia, Italy. *Plants*, 9(760).
- Dongiovanni, C., Cavalieri, V., Altamura, G., Di Carolo, M., Fumarola, G., Corrado, I., Saponari, M., De Lillo, E., & Porcelli, F. (2016). Risultati e discussione preliminari di prove comparative di efficacia per il controllo di *Philaenus spumarius*, vettore di *Xylella fastidiosa*. *Atti Giornate Fitopatologiche Vol. 1*, 393–402.
- Dongiovanni, C., Di Carolo, M., Fumarola, G., Tauro, D., Altamura, G., & Cavalieri, V. (2018). Evaluation of insecticides for the control of juveniles of *Philaenus spumarius* L. 43.
- Dongiovanni, C., Fumarola, G., Di Carolo, M., Tedone, B., Ancona, S., Palmisano, F., Silletti, M., & Cavalieri, V. (2020). Ulteriori acquisizioni per il controllo di *Philaenus spumarius* vettore di *Xylella fastidiosa*. *Giornate Fitopatologiche*, 257–266.
- Dongiovanni, C., Fumarola, G., Zicca, S., Surano, A., Di Carolo, M., & Datome, G. (2021). In vitro and in vivo effects of ammonium chloride on *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* infecting olives. 3rd European Conference on *Xylella Fastidiosa* and XF-ACTORS.
- Dzaganiya, A. M. (1967). Data on the characteristics of development of the pathogen of olive spot in Georgia. *Georgia. Soobshch. Akad. Nauk. Gruz., S.S.R.*, 46, 199–205.
- EFSA. (n.d.). *Xylella fastidiosa*. Retrieved July 10, 2022, from <https://www.efsa.europa.eu/it/topics/topic/xylella-fastidiosa>
- EFSA. (2018). Scientific Opinion on the updated pest categorisation of *Xylella fastidiosa*. In *EFSA Journal*.
- EFSA. (2019). Update of the Scientific Opinion on the risks to plant health posed by *Xylella fastidiosa* in the EU territory. *EFSA Journal*, 17(5), 200.

- Elbeaino, T., Valentini, F., Abou Kubaa, R., Moubarak, P., Yaseen, T., & Digiario, M. (2014). Multilocus sequence typing of *Xylella fastidiosa* isolated from olive affected by “olive quick decline syndrome” in Italy. *Phytopathologia Mediterranea*, 53, 533–542.
- European Commission. (2015). Commission Implementing Decision (EU) 2015/789 of 18 May 2015 as regards measures to prevent the introduction into and the spread within the Union of *Xylella fastidiosa* (Wells et al.). *Official Journal of European Union*, 125, 36–53.
- European Parliament. (2016). Regulation (EU) 2016/2031 of the European Parliament of the Council of 26 October 2016 on protective measures against pests of plants, amending Regulations (EU) 228/2013, (EU) 652/2014 and (EU) 1143/2014 and repealing Council Directives 69/464/EEC, 74/647/. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32016R2031>
- Faemma, R., Agosteo, G. E., Schena, L., Mosca, S., Frisullo, S., Magnano Di San Lio, G., & Cacciola, S. O. (2011). *Colletotrichum clavatum* sp. Nov. identified as the causal agent of olive anthracnose in Italy. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(2), 283–302. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-9547
- Ferrari, M., Marcon, E., & Menta, A. (2006). *Fitopatologia, entomologia agraria e biologia applicata*. Edagricole.
- Ferrari, M., Menta, A., Marcon, E., & Montermini, A. (1999). *Malattie e parassiti delle piante da fiore, ornamentali e forestali*.
- Fitogest. (2022). <https://fitogest.imagelinenetwork.com>
- Ganassi, S., Cascone, P., Di Domenico, C., Pistillo, M., Formisano, G., Giorgini, M., Grazioso, P., Germinara, G. S., De Cristofaro, A., & Guerrieri, E. (2020). Electrophysiological and behavioural response of *Philaenus spumarius* to essential oils and aromatic plants. *Scientific Reports*, 10.
- Germinara, G. S., Ganassi, S., Pistillo, M. O., Di Domenico, C., De Cristofaro, A., & Di Palma, A. M. (2017). Antennal olfactory responses of adult meadow spittlebug, *Philaenus spumarius*, to volatile organic compounds (VOCs). *PLoS ONE*, 12.
- Giampetruzzi, A., Baptista, P., Morelli, M., Cameirao, C., Neto, T. L., Costa, D., Datome, G., Abou Kubaa, R., Altamura, G., & Saponari, M. (2020). Differences in the endophytic microbiome of olive cultivars infected by *Xylella fastidiosa* across Seasons. *Pathogens*, 9(723).

- Giampetruzzi, A., Saponari, M., Almeida, R. P. P., Essakhi, S., Boscia, D., Loconsole, G., & Saldarelli, P. (2017). Complete genome sequence of the olive-infecting strain *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* De Donno. *Genome Announcements*, 5.
- Goidanich, G. (1978). *Manuale di patologia vegetale*, Volume III. Edizione Agricole.
- González-Domínguez, E., Armengol, J., & Rossi, V. (2017). Biology and epidemiology of venturia species affecting fruit crops: A review. *Frontiers in Plant Science*, 8(September). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01496>
- Graniti, A. (1993). Olive scab: a review. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 23, 377–384.
- Graniti, A., Faedda, R., Cacciola, O., & di San Lio, M. (2011). Olive diseases in a changing ecosystem. In *Olive Diseases and Disorders* (Issue January).
- Graniti, A., Frisullo, S., Pennisi, A. M., & Magnano di San Lio, G. (1993). Infections of *Glomerella cingulata* on olive in Italy. *EPPO Bulletin*, 23, 457–465.
- Guechi, A., & Girre, L. (1994). Sources of *Cycloconium oleaginum* (Cast.) conidia for infection of olive region of Sétif, Algeria. *Mycopathologia*, 125, 163–171.
- Holb, I. J., Gonda, I., & Bitskey, K. (2001). Pruning and incidence of diseases and pest in environmentally oriented apple growing systems: some aspects. *International Journal of Horticultural Science*, 7(1), 24–29.
- Iannotta, Loconsole, G., Noce, M. E., Saponari, M., Savino, V. N., Vizzarri, V., & Zaffina, F. (2012). Principali patogeni e difesa. *Collana Divulgativa Dell'Accademia Nazionale Dell'Olio e Dell'Olio*, XIII.
- Iannotta, & Monardo, D. (2004). Suscettibilità di cultivar di olivo a *Venturia oleaginea* (Cast.) Hugh. e correlazione con il contenuto di oleuropeina nelle foglie. *Germoplasma Olivicoli e Tipicità Dell'Olio*, 216–220.
- Iannotta, N., Monardo, D., & Perri, L. (2002). Effetti dei diversi trattamenti contro *Spiloea oleagina* (Cast.) Hugh. *Acta Horticulturae*, 586, 741–744.
- Iannotta, N., Perri, E., Siriani, R., & Tocci, C. (1999). Influence of *Colletotrichum gleosporioides* (Penzing) and *Camarosporium dalmatica* (Thum) attacks on olive oil quality. *Acta Horticulturae*, 474, 537–576.
- Kolainis, S., Koletti, A., Lykogianni, M., Karamanou, D., Gkizi, D., Tjamos, S. E., Paraskeuopoulos, A., & Aliferis, K. A. (2020). An integrated approach to improve plant

- protection against olive anthracnose caused by the *Colletotrichum acutatum* species complex. *Plos One*, 15(5), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233916>
- Kramer-Haimovich, H., Servi, E., Katan, T., Rollins, J., Okon, Y., & Prusky, D. (2006). Effect of ammonia production by *Colletotrichum gloeosporioides* on *pelB* activation, pectate lyase secretion, and fruit pathogenicity. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(2), 1034–1039. <https://doi.org/10.1128/AEM.72.2.1034-1039.2006>
- Lasorella, V., Antonino, N., Grande, O., & Guarino, A. (2022). Occhio di pavone dell'olivo, buoni risultati da *Bacillus subtilis*. *Informatore Agrario*, 14.
- Laviola, C. (1968). Aspetti biologici ed epifitologici di *Spilocaea oleagina* (Cast.). Hugh. in Italia. *Ann. Fac. Agrar. Univ. Bari*, 22, 345–360.
- Laviola, C. (1992). Problemi fitopatologici e difesa dell'olivo. In *La Difesa Delle Piante* (pp. 101–114).
- Laviola, C. (1966). Contribution to the knowledge of the biology of *Spilocaea oleagina* Apulia. *Proceedings of First Congress of the Mediterranean Phytopathological Union*, 327–339.
- Licciardello, G., Moral, J., Strano, M. C., Caruso, P., Sciara, M., Bella, P., Sorrentino, G., & Di Silvestro, S. (2022). Characterization of *Colletotrichum* strains associated with olive anthracnose in Sicily. *Phytopathologia Mediterranea*, 61(1), 139–151. <https://doi.org/10.36253/phyto-13181>
- Lo Giudice, V., Raudino, F., Magnano di San Lio, G., Cacciola, S. O., Faedda, R., & Pane, A. (2010). First report of a decline and wilt of young olive trees caused by simultaneous infections of *Verticillium dahliae* and *Phytophthora palmivora* in Sicily. *Plant Disease*, 94(11).
- López Doncel, L. M., Viruega Puente, J. R., & Trapero Casas, A. (2000). Respuesta del olivo a la inoculación con “*Spilocaea oleagina*”, agente del repilo. *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 26(3), 349–364.
- Lopez Villalta, C. (1999). Controllo dei parassiti dell'olivo. *Consiglio Oleicolo Internazionale*, 207.
- Loprieno, N., & Tenerini, I. (1959). Metodo per la diagnosi precoce dell'"Occhio di pavone" dell'olivo (*Cycloconium oleaginum* Cast.). *Journal of Phytopathology*, 34(4), 385–392. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1959.tb04007.x>

- Lops, F., Frisullo, S., & Rossi, V. (1993). Studies on the spread of the olive scab pathogen ., Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 23, 385–387.
- Loussert, R., & Brousse, G. (1978). L'Olivier. In G. P. Maisonneuve & G. Larose (Eds.), Techniques agricoles et Productions méditerranéennes (pp. 520–522).
- Maddox, C. E., Laur, L. M., & Tian, L. (2020). Antibacterial activity of phenolic compounds against the phytopathogen *Xylella fastidiosa*. *Current Microbiology*, 60, 53–58.
- Magarey, R. D., Sutton, T. B., & Thayer, C. L. (2005). A Simple Generic Infection Model for Foliar Fungal Plant Pathogens. *Phytopathology*, 95, 92–100. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0092>
- Mancuso, S. (2000). Electrical resistance changes during exposure to low temperature measure chilling and freezing tolerance in olive tree (*Olea europaea* L.) plants. *Plant, Cell and Environment*, 23(3), 291–299. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00540.x>
- Margarita, L., Porta Puglia, A., & Quacquarelli, A. (1986). *Colletotrichum acutatum*, nuovo patogeno dell'olivo in Cina e confronto con l'agente della “lebbra” dell'olivo. *Annuario Istituto Sperimentale Patologia Vegetale*, 11, 125–133.
- Marras, F. (1962). La “lebbra” delle olive (da *Gloeosporium olivarum* Alm.) in Sardegna. *Note Fitopatologiche per La Sardegna*, 1, 1–8.
- Martelli, G. P. (1959). La lebbra delle olive. Presenza e diffusione in Calabria. *Italia Agricola*, 96, 905–914.
- Martelli, G. P. (1960). Primo contributo alla conoscenza della biologia di *Gloeosporium olivarum* Alm. *Phytopathologia Mediterranea*, 1, 31–43.
- Martelli, G. P. (1961). Acervuli di *Gloeosporium olivarum* Alm. su foglie di olivo. *Phytopathologia Mediterranea*, 1, 125–128.
- Martín, M., Trapero Casas, A., & García Figueres, F. (2002). Inicadores específicos para detectar las especies de “*Colletotrichum*” causantes de la antracnosis de los olivos. *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 28(1), 43–50.
- Matta, A., Buonauro, R., Scala, A., Favaron, F., & Scala, F. (2017). *Fondamenti di patologia vegetale*. Patron Editore.
- Mazzalupo, I., Stefanizzi, F., & Perri, E. (2009). Evaluation of olives cultivated in southern Italy by simple sequence repeat markers. *Horticultural Science*, 54.

- Mezei, I., Convertini, S., Drei, F., Tescari, E., Tornè, M., Cavalieri, V., Dongiovanni, C., & Porcelli, F. (2017). Vector control. European Conference on Xylella 2017. Finding Answers to a Global Problem., 58.
- Mijuskovic, M. (1968). Contribution to the study of fungus in the olive leaf. *Phytopathology*, 39, 398–403.
- Miller, H. N. (1949). Development of the leaf spot fungus in the olive leaf. *Phytopathology*, 39, 403–410.
- Mincione, A. ., Valenzise, M., Poiana, M., Agosteo, G. E., & Taccone, P. (2004). Ricerche sugli oli di oliva vergini calabresi. Influenza delle fitopatie sulle caratteristiche qualitative degli oli. Nota I - Effetti diretti degli attacchi di Antracnosi. *La Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, 81, 9–17.
- Mitter, B., Brader, G., Pfaffenbichler, N., & Sessitsch, A. (2019). Next generation microbiome applications for crop production. Limitations and the need of knowledge-based solutions. *Current Microbiology*, 49, 59–65.
- Miyara, I., Shafran, H., Kramer Haimovich, H., Rollins, J., Sherman, A., & Prusky, D. (2008). Multi-factor regulation of pectate lyase secretion by *Colletotrichum gloeosporioides* pathogenic on avocado fruits. *Molecular Plant Pathology*, 9(3), 281–291. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00462.x>
- Moral, J., Agustí-Brisach, C., Raya, M. C., Jurado-Bello, J., López-Moral, A., Roca, L. F., Chattaoui, M., Rhouma, A., Nigro, F., Sergeeva, V., & Trapero, A. (2021). Diversity of colletotrichum species associated with olive anthracnose worldwide. *Journal of Fungi*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/jof7090741>
- Moral, J., Alsalimiya, M., Roca, L. F., Díez, C. M., León, L., De La Rosa, R., Barranco, D., Rallo, L., & Trapero, A. (2015). Relative susceptibility of new olive cultivars to *spillocaea oleagina*, *Colletotrichum acutatum*, And *pseudocercospora cladosporioides*. *Plant Disease*, 99(1), 58–64. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-14-0355-RE>
- Moral, J., Bouhmidi, K., & Trapero, A. (2008). Influence of fruit maturity, cultivar susceptibility, and inoculation method on infection of olive fruit by *Colletotrichum acutatum*. *Plant Disease*, 92(10), 1421–1426. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-10-1421>
- Moral, J., Cherifi, F., Munoz-Diex, C., Xaviér, C. J., & Trapero Casas, A. (2009). Infection of olive seeds by *Colletotrichum acutatum* and its effect on germination. *Phytopathology*, 99.

- Moral, J., De Oliveira, R., & Trapero, A. (2009). Elucidation of the disease cycle of olive anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum*. *Phytopathology*, 99(5), 548–556. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-5-0548>
- Moral, J., Jurado-Bello, J., Sánchez, M. I., De Oliveira, R., & Trapero, A. (2012). Effect of temperature, wetness duration, and planting density on olive anthracnose caused by *Colletotrichum* spp. *Phytopathology*, 102(10), 974–981. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-11-0343>
- Moral, J., & Trapero, A. (2009). Assessing the susceptibility of olive cultivars to anthracnose caused by *colletotrichum acutatum*. *Plant Disease*, 93(10), 1028–1036. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1028>
- Moral, J., & Trapero, A. (2012). Mummified fruit as a source of inoculum and disease dynamics of olive anthracnose caused by *Colletotrichum* spp. *Phytopathology*, 102(10), 982–989. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-11-0344>
- Moral, J., Xaviér, C., Roca, L. F., Romero, J., Moreda, W., & Trapero, A. (2014). La Antracnosis del olivo y su efecto en la calidad del aceite. *Grasas y Aceites*, 65(2), 1–16. <https://doi.org/10.3989/gya.110913>
- Moreira, V., Mondino, P., & Alaniz, S. (2021). Olive anthracnose caused by *Colletotrichum* in Uruguay: Field symptoms, species diversity and flowers and fruits pathogenicity. *European Journal of Plant Pathology*, 160, 663–681.
- Morelli, M., García-Madero, J. M., Jos, Á., Saldarelli, P., Dongiovanni, C., Kovacova, M., Saponari, M., Arjona, A. B., Hackl, E., Webb, S., & Compant, S. (2021). *Xylella fastidiosa* in olive: A review of control attempts and current management. *Microorganisms*, 9(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081771>
- Morettini, A. (1951). Influence of premature defoliation on blossom and fruit production of olive tree. *Annali Della Sperimentazione Agraria*, 5, 547–479.
- Mosca, S., Li Destri Nicosia, M. G., Cacciola, S. O., & Schena, L. (2014). Molecular analysis of *Colletotrichum* species in the carposphere and phyllosphere of olive. *PLoS ONE*, 9(12), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114031>
- Mugnai, L., Surico, G., & Ragazzi, A. (1993). *Glomerella cingulata* on olive in India: morphological and pathological notes. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 23, 449–455.

- Nigro, F., Antelmi, I., & Sion, V. (2017). Lebbra dell'olivo epidemiologia e strategie di difesa. *L'Informatore Agrario*, 24, 57–61.
- Nunney, L., Ortiz, B., Russel, S. A., Sanchez, R. R., & Stouthamer, R. (2014). The complex biogeography of the plant pathogen *Xylella fastidiosa*: Genetic evidence of introductions and subspecific introgression in Central America. *PLoS ONE*, 9(11).
- Obanor, F. O. (2006). Olive leaf spot: Epidemiology and control. In PhD Thesis Lincoln University.
- Obanor, F. O., Walter, M., Jones, E. E., & Jaspers, M. V. (2005). Sources of variation in a field evaluation of the incidence and severity of olive leaf spot. *New Zealand Plant Protection* 58:273-277, 58, 273–277.
- Obanor, F. O., Walter, M., Jones, E. E., & Jaspers, M. V. (2008). Effect of temperature, relative humidity, leaf wetness and leaf age on *Spilocaea oleagina* conidium germination on olive leaves. *European Journal of Plant Pathology*, 120(3), 211–222. <https://doi.org/10.1007/s10658-007-9209-6>
- Obanor, F. O., Walter, M., Jones, E. E., & Jaspers, M. V. (2011). Effects of temperature, inoculum concentration, leaf age, and continuous and interrupted wetness on infection of olive plants by *Spilocaea oleagina*. *Plant Pathology*, 60(2), 190–199. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02370.x>
- Pane, A., Pappalardo, P., Agosteo, G. E., Cacciola, S. O., & Perrotta, G. (1998). Differenziazione di biotipi di *Colletotrichum gloeosporioides* sulla base della sensibilità al benomyl. *Bollettino Dell'Accademia Gioenia Di Scienze Naturali in Catania*, 31(354), 37–55.
- Pangallo, S., Li Destri Nicosia, M. G., Agosteo, G. E., Abdelfattah, A., Romeo, F. V., Cacciola, S. O., Rapisarda, P., & Schena, L. (2017). Evaluation of a pomegranate peel extract as an alternative means to control olive anthracnose. *Phytopathology*, 107(12), 1462–1467. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-17-0133-R>
- Pangallo, S., Li Destri Nicosia, M. G., Agosteo, G. E., & Schena, L. (2022). Control of olive anthracnose and leaf spot disease by bloom treatments with a pomegranate peel extract. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(4), 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.09.001>

- Pennisi, A. M., Agosteo, G. E., & Grasso, S. (1993). Chemical control of the olive rot caused by *Glomerella cingulata*. *Bulletin OEPP/EPPO*, 23, 467–472.
- Petri, L. (1913). Studi sulle malattie dell'olivo. *Mem. R. Staz. Patol. Veg.*
- Pettinari, C. M. (1957). First contributions to researches on *Cycloconium oleagineum* and the behaviour of parasite in the olive grove of Lazio. *Bollettino Patologia Vegetale*, 3(15), 215–239.
- Pollini, A. (2018). *Entomologia applicata*. Edagricole.
- Preto, G., Martins, F., Pereira, J. A., & Baptista, P. (2017). Fungal community in olive fruits of cultivars with different susceptibilities to anthracnose and selection of isolates to be used as biocontrol agents. *Biological Control*, 110(9).
- Prota, U. (1958). Observations and investigations on the “peacock’s eye” induced by *Cycloconium oleagineum*: infection period, appearance and evolution of leaf spots; phylloptosis; conidiogenesis. In *Contribution to the pathology of the cultivated olive in Sardinia*. I (pp. 256–288). *Annali della facoltà di Agraria*. Università di Sassari.
- Prota, U. (1995). Le malattie dell'olivo. *Informatore Fitopatologico*, 45, 16–26.
- Prusky, D., McEvoy, J. L., Leverentz, B., & Conway, W. S. (2001). Local modulation of host pH by *Colletotrichum* species as a mechanism to increase virulence. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 14(9), 1105–1113. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2001.14.9.1105>
- Ranieri, E., Ruschioni, S., Riolo, P., Isidoro, N., & Romani, R. (2016). Fine structure of antennal sensilla of the spittlebug *Philaeenus spumarius* L. (Insecta: Hemiptera: Aphrophoridae). I. Chemoreceptors and thermo-/hygroreceptors. *Arthropod Struct. Dev.*, 45, 432–439.
- Regione Puglia. (2022). Piano d'azione per contrastare la diffusione di *Xylella fastidiosa* (Well et al.) in Puglia.
- Ricciolini, M., & Rizzo, D. (2010). *Avversità dell'olivo e strategie di difesa in Toscana* (R. Toscana (Ed.)). Arsia.
- Roca, L. F., Moral, J., Viruega, J. R., Ávila, A., Oliveira, R., & Trapero, A. (2007). Copper Fungicides in the Control of Olive Diseases. *Olea*, 26(26), 48–50.
- Roca, & Trapero Casas, A. (2010). Métodos culturales , químicos y En este artículo se resume la información sobre las principa-. *Vida Rural*, 38–42.

- Romero, J., Agustí-Brisach, C., Roca, L. F., Moral, J., Gonzalez-Dominguez, E., Rossi, V., & Trapero, A. (2018). A long-term study on the effect of agroclimatic variables on olive scab in Spain. *Crop Protection*, 114(August), 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.08.006>
- Romero, J., Moral, J., Gonzalez-dominguez, E., Agustí-brisach, C., Roca, L. F., Rossi, V., & Trapero, A. (2021). Logistic models to predict olive anthracnose under field conditions. *Crop Protection*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105714>
- Rongai, D., Basti, C., & Di Marco, C. (2012). A natural product for the control of olive leaf spot caused by *Fusicladium oleagineum* (Cast.) Ritschel & Braun. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(2), 276–282.
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rossman, A. Y., Crous, P. W., Hyde, K. D., Hawksworth, D. L., Aptroot, A., Bezerra, J. L., Bhat, J. D., Boehm, E., Braun, U., Boonmee, S., Camporesi, E., Chomnunti, P., Dai, D. Q., D'souza, M. J., Dissanayake, A., Jones, E. B. G., Groenewald, J. Z., Hernández-Restrepo, M., Hongsanan, S., ... Zhang, Y. (2015). Recommended names for pleomorphic genera in Dothideomycetes. *IMA Fungus*, 6(2), 507–523. <https://doi.org/10.5598/ima fungus.2015.06.02.14>
- Roubal, C., Regis, S., & Nicot, P. C. (2013). Field models for the prediction of leaf infection and latent period of *Fusicladium oleagineum* on olive based on rain, temperature and relative humidity. *Plant Pathology*, 62(3), 657–666. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02666.x>
- Saad, A. T., & Masri, S. (1978). Epidemiological studies on Olive leaf spot incited by *Spilocaea oleaginea* (Cast.) Hughes. *Phytopathologia Mediterranea*, 17(3), 170–173.
- Sabella, E., Aprile, A., Genga, A., Siciliano, T., Nutricati, E., Nicolì, F., Vergine, M., Negro, C., De Bellis, L., & Luvisi, A. (2019). Xylem cavitation susceptibility and refilling mechanisms in olive trees infected by *Xylella fastidiosa*. *Scientific Reports*, 9, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46092-0>

- Salerno, M. (1966). The olive leaf spot *Spilocaea oleagina* (Cast.) Hugh. Considerations on biology and control. *Review of Applied Mycology*, 45(184).
- Salt, D. E., Baxter, I., & Lahner, B. (2008). Ionomics and the study of the plant ionome. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 709–733. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092942>
- Santilli, E., Riolo, M., La Spada, F., Pane, A., & Cacciola, S. O. (2020). First Report of Root Rot Caused by *Phytophthora bilobang* on *Olea europaea* in Italy. *Plants*, 9(7), 826.
- Sanzani, S. M., Schena, L., Nigro, F., Sergeeva, V., Ippolito, A., & Salerno, M. G. (2012). Abiotic Diseases in Olives. *Journal of Plant Pathology*, 94(24), 469–491.
- Saponari, M., Boscia, D., Nigro, F., & Martelli, G. P. (2013). Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 95(3), 668. <https://doi.org/10.4454/JPP.V95I3.034>
- Saponari, M., Giampetruzzi, A., Loconsole, G., Boscia, D., & Saldarelli, P. (2019). *Xylella fastidiosa* in olive in apulia: Where we stand. *Phytopathology*, 109(2), 175–186. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0319-FI>
- Saponari, M., Loconsole, G., Cornara, D., Yokomi, R. K., De Stradis, A., Boscia, D., Bosco, D., Martelli, G. P., Krugner, R., & Porcelli, F. (2014). Infectivity and transmission of *Xylella fastidiosa* by *Philaenus spumarius* (Hemiptera: Aphrophoridae) in Apulia, Italy. *Journal of Economic Entomology*, 107(4), 1316–1319. <https://doi.org/10.1603/EC14142>
- Saponaro, A. (1953). Presenza di *Gloeosporium olivarum* Alm. sugli organi vegetativi dell'olivo nel leccese e nel brindisino. *Annali Della Sperimentazione Agraria*, 7, 609–619.
- Schena, L., Abdelfattah, A., Mosca, S., Li Destri Nicosia, M. G., Agosteo, G. E., & Cacciola, S. O. (2017). Quantitative detection of *Colletotrichum godetiae* and *C. acutatum* sensu stricto in the phyllosphere and carposphere of olive during four phenological phases. *European Journal of Plant Pathology*, 149(2), 337–347. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1185-x>
- Schena, L., Agosteo, G. E., & Cacciola, S. O. (2011). Olive Diseases and Disorders. *Transworld Research NetWork*.
- Schena, L., Mosca, S., Cacciola, S. O., Faedda, R., Sanzani, S. M., Agosteo, G. E., Sergeeva, V., & Magnano di San Lio, G. (2014). Species of the *Colletotrichum gloeosporioides* and *C.*

- boninense complexes associated with olive anthracnose. *Plant Pathology*, 63(2), 437–446.
<https://doi.org/10.1111/ppa.12110>
- Schnabel, G., Schnabel, E. L., & Jones, A. L. (1999). Characterization of ribosomal DNA from *Venturia inaequalis* and its phylogenetic relationship to rDNA from other tree-fruit *Venturia* species. *Phytopathology*, 89(1), 100–108. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1999.89.1.100>
- Schneider, K., Van der Werf, W., Cendoya, M., Mourits, M., Navas-Cortés, J.A. Vicent, A., & Lansink, A. O. (2020). Impact of *Xylella fastidiosa* subspecies *pauca* in European olives. *National Academy of Science*, 9250–9259.
- Schubert, K., Rischel, A., & Braun, D. U. (2013). A monograph of *Fusicladium* s.lat. (Hyphomycetes). *Schlechtendalia*, 9(0), 1–132.
- Sergeeva, V. (2011). What is effective against anthracnose? *The Olive Press*, July, 22–24.
- Sergeeva, V., & Spooner-Hart, R. (2010). Anthracnose and Queensland fruit fly in olives. *The Olive Press*, 16, 23–24.
- Sergeeva, V., Spooner-Hart, R., & Nair, N. G. (2008). First report of *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* causing leaf spots of olives (*Olea europaea*) in Australia. *Australasian Plant Disease Notes*, 3(1), 143–144. <https://doi.org/10.1007/bf03211271>
- Simmonds, J. H. (1965). A study of the species of *Colletotrichum* causing ripe fruit rots in Queensland. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Science*, 22, 437–459.
- Sostizzo, T., Bunter, M., & Schaerer, S. (2018). *Xylella fastidiosa*. In *Agroscope* (Vol. 60). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2004.00718.x>
- Talhinhas, P., Loureiro, A., & Oliveira, H. (2018). Olive anthracnose: a yield- and oil quality-degrading disease caused by several species of *Colletotrichum* that differ in virulence, host preference and geographical distribution. *Molecular Plant Pathology*, 19(8), 1797–1807. <https://doi.org/10.1111/mpp.12676>
- Talhinhas, P., Mota-Capitão, C., Martins, S., Ramos, A. P., Neves-Martins, J., Guerra-Guimarães, L., Várzea, V., Silva, M. C., Sreenivasaprasad, S., & Oliveira, H. (2011). Epidemiology, histopathology and aetiology of olive anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* in Portugal. *Plant Pathology*, 60, 483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02397.x>

- Talhinhas, P., Neves-Martins, J., Oliveira, H., & Sreenivasaprasad, S. (2009). The distinctive population structure of *Colletotrichum* species associated with olive anthracnose in the Algarve region of Portugal reflects a host-pathogen diversity hot spot. *FEMS Microbiology Letters*, 296(1), 31–38. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2009.01613.x>
- Tosi, L., & Zizzerini, A. (2000). L'occhio disease pavone dell'olivo: prospettive e strategie disease difesta nell'Italia centrale. *Olivo and Olio*, 6.
- Trapero, A., Viruega, J. R., López-Doncel, L. M., Segura, R., Alsalimiya, M., Moral, J., & Roca, L. F. (2010). Repilo del Olivo. In R. M. Jiménez Díaz & E. Montesinos Seguí (Eds.), *Enfermedades de las plantas causadas por hongos y oomicetos* (Issue 13, pp. 267–281). Phytoma.
- Trapero Casas, A. (2003). La Antracnosis o Aceituna jabonosa en el cultivo del olivo. *Vida Rural*, 168, 46–50.
- Vergine, M., Meyer, J. B., Cardinale, M., Sabella, E., Hartmann, M., Cherubini, P., De Bellis, L., & Luvisi, A. (2020). The *Xylella fastidiosa*-resistant olive cultivar “Leccino” has stable endophytic microbiota during the Olive Quick Decline Syndrome (OQDS). *Pathogens*, 9(35).
- Viruega, J. R., Moral, J., Roca, L. F., Navarro, N., & Trapero, A. (2013). *Spilocaea oleagina* in olive groves of southern Spain: Survival, inoculum production, and dispersal. *Plant Disease*, 97(12), 1549–1556. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-12-1206-RE>
- Viruega, J. R., Roca, L. F., Moral, J., & Trapero, A. (2011). Factors affecting infection and disease development on olive leaves inoculated with *Fusicladium oleagineum*. *Plant Disease*, 95(9), 1139–1146. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-11-0126>
- Viruega, J. R., & Trapero, A. (1999). Epidemiology of leaf spot of olive tree caused by *Spilocaea oleagina* in Southern Spain. 3rd International ISHS Symposium on Olive Growing, 531–534.
- Viruega, J. R., Trapero, A., & Moreno, S. (2002). Efficacy of Kresoxim-Methyl against Olive Leaf Spot caused by *Spilocaea oleagina*. *Acta Horticulturae*, 586, 801–804. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.586.173>
- Vos, S., Camilleri, M., Diakaki, M., Lázaro, E., Parnell, S., Schrader, G., & Vicent, A. (2019). Pest survey card on *Xylella fastidiosa*. EFSA Supporting Publications, 16(6). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.en-1667>

- Weaver, C. R., & King, D. R. (1954). Meadow spittlebug, *Philaenus leucophthalmus* (L.). Ohio Agricultural Experiment Station. Research Bulletin, 741, 1–99.
<http://hdl.handle.net/1811/63036%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Meadow+spittlebug#1>
- Wells, J. M., Raju, B. C., Hung, H. Y., Weisburg, W. G., Mandelco-Paul, L., & Brenner, D. J. (1987). Gram-negative, xylem-limited, fastidious plant bacteria related to *Xanthomonas* spp. *Journal of Syst. Evol. Microbiology*, 37, 136–143.
- Wharton, P. S., & Diéguez-Uribeondo, J. (2004). The biology of *Colletotrichum acutatum*. *Anales Del Jardin Botanico de Madrid*, 61(1), 3–22.
<https://doi.org/10.3989/ajbm.2004.v61.i1.61>
- Wilson, E. E., & Miller, H. N. (1949). Olive leaf spot and its control with fungicides. *Hilgardia*, 19(1), 1–24.
- Yakoby, N., Beno-Moualem, D., Keen, N. T., Dinoor, A., Pines, O., & Prusky, D. (2001). *Colletotrichum gloeosporioides* pelB is an important virulence factor in avocado fruit-fungus interaction. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 14(8), 988–995.
<https://doi.org/10.1094/MPMI.2001.14.8.988>
- Zachos, D. G., & Makris, S. A. (1963). Recherches sur le *Gloeosporium olivarum* en Grèce. II. Symptomatologie de la maladie. *Annals of the Institute of Phytopathology Benaki*, 5, 128–130.
- Zarco, A., Viruega Puente, J., Roca Castillo, L., & Trapero, C. A. (2007). Detección de las infecciones latentes de “*Spilocaea oleagina*” en hojas de olivo. *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 33(2), 235–248.
- Zicca, S., De Bellis, P., Masiello, M., Saponari, M., Saldarelli, P., Boscia, D., & Sisto, A. (2020). Antagonistic activity of olive endophytic bacteria and of *Bacillus* spp. strains against *Xylella fastidiosa*. *Microbiology Research*, 236.
- Zimbalatti, G., Polizzi, G., & Agosteo, G. E. (1992). Valutazione della distribuzione di anticrittogamici con irroratrici ad aeroconvezione su piante di olivo di notevoli dimensioni.pdf. *ATTI Giornate Fitopatologiche*, 297–306.

CAPITOLO 4 - SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI (DSS) IN AGRICOLTURA E DIFESA FITOSANITARIA

Nessun avvenimento nella storia dell'umanità ha determinato un impatto importante sull'ambiente e sulla società come l'avvento dell'agricoltura. Tale pratica ha reso possibile gettare le basi della civiltà come la conosciamo oggi (Atkins, Simmons, & Roberts, 1998).

Ripercorrendo la storia dell'agricoltura, dalla sua nascita intorno al 10.000 a.C. fino ai giorni nostri si sono susseguiti sviluppi tecnici e cambiamenti operativi sempre più rapidi e appariscenti, passando dalla cosiddetta "agricoltura 1.0" all'"agricoltura 4.0".

4.1 Smart farming e agricoltura digitale

Per la maggior parte della propria storia l'agricoltura, definita come "agricoltura 1.0", ha fatto riferimento solamente alla forza di lavoro umana e degli animali. La situazione è rimasta invariata fino all'inizio del XX secolo, fornendo modesti risultati produttivi e utilizzando strumenti di lavoro semplici.

Negli anni '50, a seguito della prima rivoluzione industriale e dell'invenzione dei motori a vapore, si diffuse ampiamente il ricorso alla meccanizzazione agraria, ai fertilizzanti chimici e a prodotti fitosanitari. Questa svolta drastica verso un'agricoltura industriale, dove il ricorso alla meccanizzazione e all'industria chimica è stato estremamente rilevante, con ripercussioni purtroppo non previste sulla salute umana e sull'ambiente, prende il nome di "agricoltura 2.0". La maggiore consapevolezza dell'importanza di tutelare la salute umana e ambientale e di razionalizzare l'utilizzo delle risorse portò, verso la fine del XX secolo, allo sviluppo della cosiddetta "agricoltura di precisione" o "agricoltura 3.0". Questo tipo di agricoltura è caratterizzata dall'avvento nell'uso di computer e strumenti di geo localizzazione satellitare per raccogliere dati "spazializzati" e assistere le macchine agricole nella distribuzione di *input* (Zhai, Martínez, Beltran, & Martínez, 2020).

La raccolta di dati, in abbinamento ad opportune elaborazioni ed analisi, ha permesso di orientare le decisioni operative in funzione della variabilità spaziale e temporale, portando ad un miglioramento dell'efficienza nell'uso delle risorse, della produttività, della qualità, della redditività e della sostenibilità della produzione agricola (Rossi, Caffi, & Salinari, 2012).

A seguito dello sviluppo delle tecnologie *IoT*, dell'utilizzo dei *Big Data*, dell'intelligenza artificiale e dei sistemi *Cloud* e della loro applicazione in ambito agricolo, oggi, si può parlare a tutti gli effetti di "agricoltura 4.0", o *smart agriculture*. Lo "*smart farming*" è a tutti gli effetti un'evoluzione dell'agricoltura di precisione dove l'ampio uso di internet e la capacità di elaborazione, comunicazione e utilizzazione di grandi quantità di dati da parte di strumenti tecnologici, in combinazione con un crescente aumento della comprensione degli stessi e, di conseguenza, dell'attendibilità delle risposte generate, garantiscono la tempestività degli interventi e allo stesso tempo il mantenimento di elevati standard qualitativi e quantitativi (Zhai et al., 2020; Mitra, Bapala, & Mohanty, 2022)

È previsto che la popolazione mondiale raggiunga i 9,7 miliardi nel 2050 e gli 11 miliardi entro la fine del secolo con un conseguente aumento della domanda di prodotti (Mitra et al., 2022). Praticare un'agricoltura più produttiva e sostenibile in un contesto di cambiamento climatico è una sfida difficile; le pratiche agricole devono essere rivoluzionate per raggiungere gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG's) entro il 2030 (Bertoglio, Corbo, Renga, & Matteucci, 2021). Per rispondere alle necessità sopra menzionate, istituzioni internazionali come la Banca Mondiale e la FAO hanno raccomandato una transizione globale verso l'agricoltura digitale, che può quindi essere definita come "*una strategia per affrontare le sfide del cambiamento climatico e della sicurezza alimentare aumentando in modo sostenibile la produttività, rafforzando la resilienza, riducendo le emissioni di gas serra e migliorando il raggiungimento degli obiettivi nazionali di sicurezza e sviluppo*" (Bertoglio et al., 2021; Chandra, McNamara, & Dargusch, 2018; Trendov, Varas, & Meng, 2019).

L'applicazione delle tecnologie di *smart farming*, infatti, può determinare un aumento sostanziale dell'efficienza delle pratiche agricole in diversi ambiti come: la gestione idrica, l'utilizzo di fertilizzanti e prodotti di difesa, l'aumento dell'efficienza di produzione, la riduzione dei costi di gestione, la riduzione di emissioni di gas serra, la riduzione dell'erosione dei suoli, la lotta alla desertificazione e l'applicazione dell'agricoltura ad aree marginali (Mitra et al., 2022).

Tuttavia, alla necessità di una concreta sostenibilità ambientale nella produzione agricola, con sistemi di coltivazione che richiedono minori apporti di prodotti fitosanitari e fertilizzanti e con un uso limitato di acqua e di fonti energetiche non rinnovabili e a una buona produzione agricola in termini quanti-qualitativi, deve necessariamente essere abbinato un soddisfacente reddito dell'azienda.

Questi tre volti della sostenibilità trovano un fondamento importante nell'agricoltura integrata, modellata in base al sito e all'azienda agricola (Boller et al., 2004; Geng, Hess, & Auburn,

1990).

In questa gestione integrata delle aziende assumono grande importanza le decisioni e le scelte prese di volta in volta dall'imprenditore agricolo, sulla base dell'esperienza e, soprattutto, delle valutazioni definite da informazioni e dati via via acquisiti (Rossi, Giosuè, & Caffi, 2010; Rossi & Legler, 2019).

4.2 Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS)

In una qualunque organizzazione di attività umane vengono continuamente prese delle decisioni che interessano i diversi livelli nella gerarchia organizzativa, con diversi gradi di importanza e criticità.

Il processo decisionale è un processo cognitivo che porta alla selezione di un'azione tra diverse soluzioni alternative e ha come risultato una scelta finale (March, 1994) (Figura 1). Tale processo inizia con l'identificazione di un problema, che richiede la raccolta di tutte le informazioni e i dati rilevanti per consentirne un'analisi critica. Successivamente si analizzano una serie di azioni alternative disponibili per la risoluzione, tenendo conto di molteplici criteri (efficacia, benefici, costi) e di quei vincoli che limitano il numero di alternative (facilità di attuazione e vincoli tecnici o legislativi). Sulla base di questa analisi, viene poi selezionata la soluzione migliore che viene poi convertita in azione (Rossi et al., 2012).

Il processo descritto può essere un processo di ragionamento, un processo basato sulle informazioni o un processo intuitivo; specialmente quando le decisioni devono essere prese rapidamente, le variabili o le soluzioni sono incerte, il processo decisionale tende ad essere più intuitivo piuttosto che strutturato, cioè non vengono valutate tutte le possibili alternative (Rossi et al., 2012).

In ogni caso le suddette decisioni possono essere classificate in base a due dimensioni: quelle di 'livello' o controllo e quelle di "natura".

Le decisioni di "livello" possono essere strategiche, tattiche od operative, mentre in termini di "natura" possono essere classificate in strutturate, semi strutturate o non strutturate (Mintzberg, 1979; Vercellis, 2009).

Raccogliendo ed elaborando opportunamente le informazioni idonee allo scopo, a partire dagli anni '70 vari studiosi si sono cimentati a mettere a punto sistemi che potessero aiutare gli operatori a



Figura 1: Le fasi del processo decisionale (Da: Caffi, Legler, Rossi 2016).

prendere decisioni gestionali nelle aziende. Nacquero così i cosiddetti Sistemi di Supporto alle Decisioni o *DSS*.

In campo agricolo essi rappresentano le tecnologie della *smart farming* più rappresentative per permettere di rispondere alle esigenze di mercato delle aziende, fornendo al contempo evidenti e quantificabili benefici sia agronomici che ambientali (Zadoks, 1984; Maloy, 1993; Rossi, Salinari, Poni, Caffi, & Bettati, 2014; Rossi, Caffi, Legler, Carotenuto, & Bigot, 2014; Legler & Rossi, 2016).

4.2.1 Introduzione ai *DSS*

Negli ultimi cinquant'anni si sono potuti osservare numerosi e rapidi cambiamenti nel settore dei sistemi di informazione, ciascuna di queste evoluzioni è stata costruita basandosi sulla sua precedente e ha contribuito ad integrare il sistema. Ad esempio, a metà degli anni '60, lo sviluppo di alcuni processori tra cui *IBM System 360*, rese possibile l'elaborazione di grandi quantità di informazioni a costi contenuti, consentendo la diffusione dei primi sistemi di gestione aziendale. Tali sistemi permisero di riunire per la prima volta l'elevato numero di informazioni necessarie per prendere delle decisioni, senza però ancora essere in grado di fornire un supporto e una guida nel processo decisionale (Rashidi, Ghodrat, Samali, & Mohammadi, 2018).

Alla fine degli anni '60, i così detti *model-oriented DSS* o *Management Decision Systems* presero un risvolto pratico grazie al lavoro di Peter Keen e Charles Stabell. Gli studiosi definirono per la prima volta il concetto di "supporto alle decisioni" estraendolo dagli studi sul processo decisionale organizzativo, condotti tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60, e dal lavoro tecnico svolto sui sistemi informatici negli anni 60' (Rashidi et al., 2018; Keen & Morton, 1978).

Nel 1961, Michael S. Morton pubblicò "*Managment Decision System: Computer-Based Support for Decision Making*", in questo e in lavori successivi venne approfondita l'influenza dei modelli analitici sul processo decisionale, contribuendo a dare inizio al movimento sui *DSS* (Rashidi et al., 2017; Rashidi et al., 2018).

Nei primi anni '70, Gorry e Morton, riconoscendo l'importanza dell'organizzazione delle informazioni, organizzarono le due classificazioni, di livello e di natura, in un *framework* matriciale creando supporti informatici idonei a elaborare un Sistema di Supporto alle Decisioni. Tale sistema venne definito come " un insieme di sistemi interattivi computerizzati che aiutano gli operatori ad utilizzare funzionalità e modelli per prendere decisioni gestionali nelle aziende" (Gorry & Morton, 1971)

Successivamente seguirono numerose altre definizioni dei sistemi di supporto alle decisioni che relativamente alla gestione d'impresa, possono essere sintetizzate nella seguente enunciazione: *un Decision Support System (DSS) è un insieme di tecnologie informatiche che, ponendo a confronto, attraverso differenti algoritmi e modelli matematici, una serie di dati raccolti e classificati in un database sono capaci di elaborare rapidamente e in modo versatile le informazioni utili a prendere rapidamente decisioni strategiche nei processi gestionali di un'azienda* (Keen & Morton, 1978; Moore & Chang, 1980; Keen, 1980; Sprague & Carlson, 1982).

Essi, rappresentano quindi un *software* in grado di supportare la figura che, in ambito aziendale, ha il compito prendere decisioni che coinvolgono problemi che non possono essere risolti con i normali modelli operativi.

Un *DSS* prevede tre componenti fondamentali (Sage, 1991): i) *Il sottosistema di gestione del database*, che include un *database* contenente i vari dati necessari al sistema e il *software* che lo gestisce (*Database Management System, DBMS*). Tale sottosistema dovrebbe essere in grado di informare gli utenti in merito ai dati disponibili e a come accedervi, ii) il sottosistema di gestione dei modelli (*MBMS*) e degli algoritmi, che include una libreria di modelli (*Model Base*) che forniscono al *DSS* capacità analitiche. Lo scopo dell'*MBMS* è convertire i dati del *DBMS* in informazioni applicando ad esso i modelli; e iii) il sottosistema interfaccia utente, che permette la comunicazione tra i diversi componenti del *DSS* e l'utente. I *DSS* devono essere dotati di interfacce intuitive e facili da usare per risultare accessibili anche agli utenti senza formazione informatica.

L'obiettivo di un *DSS* è in definitiva quello di raccogliere, elaborare, interpretare e fornire informazioni in modo "*smart*", per aiutare l'utilizzatore a prendere decisioni, senza però

sostituirsi ad esso; la decisione si ottiene infatti combinando le valutazioni dell'operatore con le informazioni elaborate dal sistema.

Gli aspetti essenziali di un *DSS* devono pertanto prevedere: i) una facilità d'uso alla portata di tutti gli utenti; ii) un ambiente interattivo; iii) una significativa efficacia nell'utilizzo dei modelli e nell'analisi dei dati; e iv) la possibilità per il sistema di fornire supporto al processo decisionale.

I *DSS* possono essere classificati in alcune categorie a seconda dell'elemento su cui si basano (Power, 2002), tra questi alcuni esempi sono: i) i *data-driven DSS*, sistemi che permettono l'accesso e l'analisi di grandi *database* strutturati; ii) i *Model-driven DSS*, basati su modelli statistici e analitici che permettono l'utilizzo di dati e parametri di input per ottimizzare l'analisi di una determinata situazione; iii) i *Knowledge driven DSS*, in grado di raccomandare specifiche azioni basandosi sulla comprensione di problemi all'interno di un determinato contesto; iv) *Communication driven and Group DSS* che forniscono un mezzo di comunicazione e collaborazione per compiti decisionali di gruppo; v) i *Document-driven DSS* sistemi con la capacità di archiviare e analizzare dati all'interno di documenti di diversa natura; e, infine vi) gli *Intelligent Decision Support System* che integrano tecnologie di intelligenza artificiale (Sousa, Pimentao, & Ribeiro, 2006).

Negli ultimi due decenni si è osservata una crescita notevole dell'attenzione che gli studiosi hanno rivolto ai sistemi di supporto alle decisioni. Secondo *Google Scholar*, nel 2007 il tasso di pubblicazione è passato da meno di tre pubblicazioni a settimana nel 1980 a venti al giorno nel 2005. Internet ha indubbiamente contribuito ad accelerare gli sviluppi e l'interesse nei confronti di questi sistemi fornendo inoltre un nuovo modo per documentare gli sviluppi della ricerca in questo settore (Rashidi et al., 2018).

4.2.2 DSS in agricoltura

I *DSS* in agricoltura nascono nella seconda metà degli anni '70 come strumenti per aiutare consulenti e agricoltori nella gestione delle colture agricole.

Originariamente si trattava di semplici sistemi di allarme computerizzati che permettevano di inviare allerte basate sui dati meteorologici e che permettevano agli agricoltori di valutare l'eventualità di un intervento fitosanitario, per poi evolversi in sistemi di supporto alle decisioni veri e propri.

Un *DSS* completamente sviluppato è in grado di raccogliere, organizzare, integrare e infine interpretare tutte le principali informazioni necessarie per la coltivazione di una specie e il raggiungimento di potenziali obiettivi quali-quantitativi di produzione. I *DSS* analizzano e

interpretano quindi l'insieme di dati e infine utilizzano l'analisi per raccomandare l'azione o le scelte più appropriate per quel determinato momento del ciclo produttivo (Agrios, 2005).

Le conoscenze specialistiche, i modelli di gestione e una raccolta tempestiva dei dati sono quindi gli elementi chiave di cui è in possesso un *DSS* per assistere efficientemente l'impresa agricola nelle interpretazioni di tali dati e nelle decisioni gestionali che riguardano le colture, sia in quelle quotidiane sia in quelle strategiche di lungo termine (Sonka et al., 1997). L'importanza che questi sistemi hanno in agricoltura risiede nel fatto che, in questo settore, più che in altri, entrano in gioco molteplici fattori ambientali e complesse dinamiche biologiche, difficili da quantificare e da prevedere. Tale complessità porta talvolta a un'eccessiva semplificazione di queste variabili, che incidono di conseguenza in maniera significativa sul rischio di impresa dell'agricoltore.

Per l'utilità che rappresentano nel settore, il numero di *DSS* per la gestione colture è andato aumentando dagli anni '80 in poi. Tuttavia, nonostante il gran numero di *DSS* che sono stati sviluppati e nonostante l'interesse sostanziale degli agricoltori nel ridurre l'incertezza nel processo decisionale (Stone & Hochman, 2004), i *DSS* hanno dato uno scarso all'agricoltura pratica a causa del "problema dell'implementazione", cioè a causa della "mancanza di un uso sostenuto in grado di influenzare la pratica" (McCown, 2002; McCown, 2012). Analisi approfondite delle ragioni della mancata adozione e del fallimento dei *DSS* in agricoltura hanno evidenziato le diverse cause che influenzano l'adozione e l'uso prolungato di questi sistemi (Parker & Champion, 1997; Magarey et al., 2002; McCown, 2002; Stone & Hochman, 2004; Matthews et al., 2008; McCown et al., 2009; Ascough et al., 2010; Hochman & Carberry, 2011). I fattori che influenzano l'utilizzo da parte dell'utente agricolo sono: i) redditività, ii) *design user-friendly*, iii) tempo richiesto per l'utilizzo del *DSS*, iv) adattamento del *DSS* alla situazione dell'azienda, v) aggiornamento delle informazioni e livello di conoscenza dell'utente (Kerr, 2004). Alla luce di ciò, il mancato utilizzo dei sistemi può quindi essere attribuito sia alle limitazioni tecniche dei *DSS*, sia all'atteggiamento degli agricoltori nei confronti del processo decisionale e dei sistemi stessi (Matthews et al., 2008; Gent, De Wolf, & Pethybridge, 2011). Parte dei problemi tecnici associati all'uso dei *DSS* in agricoltura si è attenuata negli anni '90 a seguito di una diffusione capillare dell'utilizzo di internet e dei computer che ha permesso il maggiore sviluppo e l'accesso facilitato a un gran numero di strumenti *web* (Jones et al., 2010). Nonostante parte delle limitazioni tecniche sia venuta a mancare, il *DSS* del futuro deve essere uno strumento in grado di prendere il ruolo di "super consulente" superando anche le altre limitazioni che ne hanno determinato il mancato utilizzo (Magarey et al., 2002); tra queste possiamo individuare almeno altre sei cause che hanno determinato il problema

dell'implementazione: i) i sistemi mancavano di considerare la produzione colturale in maniera olistica e come parte di un sistema multicomponente; ii) la qualità dei sistemi era piuttosto bassa e mancava di una sufficiente validazione; iii) i sistemi non erano sufficientemente *user-friendly*; iv) le informazioni non erano fornite in un intervallo di tempo utile perché l'utente potesse utilizzarle in maniera pratica nel processo decisionale e infine v) i sistemi non erano sottoposti alla dovuta manutenzione e a regolare aggiornamento (Magarey et al., 2002; Rossi et al., 2012). Oltre a queste limitazioni tecniche, è stata osservata una resistenza degli utenti nei confronti dei *DSS* che spesso deriva dal loro ruolo progettato nel processo decisionale: tali sistemi, poiché concepiti per sostituire l'utente fornendo soluzioni, non hanno avuto successo perché gli agricoltori si sono sentiti privati del loro ruolo nel processo decisionale e della loro autonomia (McCown, 2002). I *DSS* dovrebbero cercare di aiutare i gestori delle colture a soddisfare le loro esigenze in una realtà lavorativa caratterizzata da elevata incertezza e complessità, fornendogli informazioni complementari a quelle già in loro possesso (McCown, Hochman, & Carberry, 2002; Hochman & Carberry, 2011). In questo modo gli utenti possono considerare, in base ai propri processi decisionali, le informazioni che gli vengono fornite, senza sentirsi esclusi (McCown et al., 2002; Stone & Hochman, 2004).

Un ulteriore fattore che può influenzare il tasso di adozione di un *DSS* è la dimostrazione del suo impatto pratico nonché del suo valore aggiunto per l'economia aziendale (Stone & Hochman, 2004). Nel contesto della gestione agricola, l'introduzione di un *DSS* rappresenta un'importante innovazione, che richiede un cambiamento significativo nella pratica quotidiana (McCown et al., 2009); rispetto alla coltivazione di una nuova varietà di coltura, che viene definita una tecnologia continua, l'adozione di un *DSS* è definita una tecnologia discontinua in quanto richiede l'implementazione di nuove procedure di lavoro a livello aziendale, come le ispezioni di routine sul campo o la consultazione di strumenti informatici. Per questo motivo, poiché l'adozione di tale sistema sia proficua, i potenziali utenti devono riconoscere la rilevanza che questo tipo di sistemi può avere sulla loro attività e i benefici che ne derivano (McCown et al., 2009; Rossi & Legler, 2019).

Inoltre, è fondamentale il coinvolgimento dei potenziali utenti durante lo sviluppo del *DSS*: il coinvolgimento degli utenti ha infatti dimostrato di avere un impatto significativo sui benefici percepiti del *DSS*, sulla soddisfazione complessiva dell'utente e conseguentemente sull'utilizzo del sistema (Igbaria & Guimaraes, 1994).

Nonostante queste problematiche di implementazione, i *DSS* possono essere validi strumenti in grado fornire informazioni tempestive e dettagliate sui molteplici aspetti che caratterizzano la gestione di una coltivazione e, quindi, permettere al tecnico o all'agricoltore di prendere

decisioni più consapevoli e tempestive, garantendo infine la possibilità di pianificare le scelte future e le attività.

I *DSS* permettono altresì di tenere traccia del processo logico alla base di ogni scelta gestionale effettuata durante la stagione, di razionalizzare l'uso delle risorse e di gestire la coltivazione in linea con i principi dell'agricoltura sostenibile (Rossi, Salinari, et al., 2014; Legler & Rossi, 2016; Rossi & Legler, 2019).

Nel tempo sono state individuate le caratteristiche che un *DSS* deve necessariamente avere per superare tutte le limitazioni sopra descritte ed essere in grado di svolgere una funzione di super consulente che incorpora soluzioni di gestione totale per i coltivatori (Magarey et al., 2002).

In primo luogo, tale sistema deve essere uno strumento da utilizzare e non deve sostituire il decisore; deve aiutare l'utente a fare delle scelte fornendo informazioni aggiuntive e lasciandolo responsabile della scelta e dell'attuazione (Matthews et al., 2008); il super consulente deve, inoltre, essere fornito attraverso una piattaforma internet (Magarey et al., 2002) permettendo di eliminare la necessità dell'installazione di *software* e permettendo di unire gli approcci *push* e *pull* (Jones et al., 2010).

Il super consulente deve essere dotato di una maggiore automazione dell'interpretazione rispetto agli attuali *DSS* (Magarey et al., 2002), ciò richiede che i sistemi siano basati sia su file statici del sito che su informazioni specifiche. Le informazioni statiche includono fattori che non cambiano durante il periodo di crescita della coltura, come ad esempio le caratteristiche del suolo e la cultivar, mentre le informazioni specifiche del sito possono essere soggette a cambiamenti e devono essere trasmesse direttamente al *DSS* basato sul *web* sotto forma di misurazioni, come nel caso dei dati meteorologici, o rapporti di *scouting*, come lo stato fenologico attuale della coltura.

In aggiunta i *DSS* basati sul *web* consentono una migliore interazione bidirezionale con gli utenti, una riduzione dei costi di produzione delle informazioni, un migliore controllo delle prestazioni del sistema e un accesso facilitato a strumenti multimediali.

Horta, nata come spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza (UCSC), leader nel settore, ha realizzato un ecosistema di Sistemi di Supporto alle Decisioni per le principali colture agrarie italiane e tra queste anche *olivo.net*.

L'azienda ha ampiamente dimostrato come sia possibile superare il problema dell'implementazione e ottenere un notevole successo di mercato.

Le ragioni di questo successo, che possono essere prese come linee guida per lo sviluppo di nuovi *DSS*, sono le seguenti (Magarey et al., 2002; Rossi et al., 2012; Rossi, Onesti, Legler, & Caffi, 2015): a) *scopo*: *DSS* quali "strumenti" capaci di fornire assistenza e informazioni a

supporto della figura che prenderà le decisioni aziendali, quindi di affiancamento e non di sostituzione; b) *visione olistica*: DSS volti ad offrire informazioni relative a tutti gli aspetti chiave della gestione della coltura, dallo sviluppo fenologico, alla produzione, alla gestione delle malattie e degli insetti, fino alla gestione degli stress abiotici; c) *specificità*: i supporti e gli allarmi sono riferiti a una specifica Unità Produttiva (UP), con proprie caratteristiche agronomiche, topografiche, pedologiche e climatiche, che permettono una gestione uniforme nel corso della stagione e sono atte a fornire una base dati più dettagliata, e di conseguenza *output* statisticamente più attendibili; d) *interattività*: il DSS offre all'utente un ruolo di partecipazione attiva tramite un processo di trasferimento di informazioni, in grado di interagire con il sistema attraverso l'inserimento dei dati osservati in campo, così da ricalibrare le notifiche agronomiche e gli *alert* sulla base di queste osservazioni; e) *aggiornamento in tempo reale*: il sistema riceve in tempo reale i dati rilevati in campo e li utilizza come variabili di *input* per i modelli matematici operanti nel sistema, i cui *output* vengono aggiornati di ora in ora; f) *interfaccia utente*: con navigazione nel portale intuitiva e dinamica, che permette di scegliere il livello di dettaglio con cui esplorare le informazioni fornite, visualizzate in un formato grafico che sfrutta colori e simboli, in grado di comunicare in modo immediato, efficace ed univoco lo stato di ciascun componente di gestione della coltura; g) *accessibilità*: servizio accessibile via internet da qualsiasi *browser* e dispositivo, 24 ore su 24, ogni giorno, senza richiedere l'installazione di nessun software specifico; h) *versatilità*: i dati meteo necessari al funzionamento del DSS possono essere raccolti da una qualsiasi stazione meteo, rete agrometeorologica o rete di sensori *wireless*, indipendentemente dalla marca del produttore. Allo stesso modo i dati di monitoraggio possono essere inseriti nel sistema attraverso diversi strumenti, come tablet e smartphone; i) *approccio partecipativo*: sviluppo dei DSS in stretta collaborazione tra mondo della ricerca, consulenti agronomi, tecnici ed esperti del settore in modo da affrontare correttamente le reali necessità ed i bisogni degli operatori (Rossi et al., 2013)

Piuttosto che sostituire il decisore, questa nuova generazione di DSS lo aiuta a scegliere tra le azioni disponibili, fornendo informazioni aggiuntive. Una decisione si traduce in un'azione da eseguire nell'ambiente della coltura. Dopo l'attuazione dell'azione, l'ambiente viene nuovamente monitorato per iniziare un nuovo ciclo di flusso di informazioni. In questo modo, le informazioni fluiscono da e verso l'ambiente in un ciclo infinito che inizia con il rilevamento e termina con l'azione (Sonka et al., 1997).

4.2.3 *L'importanza del processo decisionale nella difesa fitosanitaria integrata e gli strumenti a supporto*

Durante il periodo dell'agricoltura 2.0 gli agricoltori fecero ampio ricorso all'uso di prodotti di difesa con l'illusione che fosse necessario per mantenere una produzione elevata; tuttavia, ciò determinò non solo l'aumento dei costi di produzione ma una perturbazione degli ecosistemi. L'uso dei prodotti di difesa in maniera non razionale portò infatti ad una serie di effetti collaterali tra cui la perdita di biodiversità e di fertilità del suolo e, nel campo della difesa, alla selezione di nuove forme di resistenza tra i patogeni; per mantenere una produzione sufficientemente elevata e di qualità, gli agricoltori si sono quindi trovati a dover aumentare ulteriormente l'utilizzo di prodotti fitosanitari, innescando un circolo vizioso che ha avuto come risultato l'aumento dei costi e la presenza di residui sugli alimenti (Rossi et al., 2012).

Il verificarsi di queste problematiche determinò una maggiore consapevolezza nella comunità scientifica riguardo la necessità di cambiare i metodi di lotta ai patogeni e portò nel 1956 alla nascita dell'Organizzazione Internazionale per il Controllo Biologico (*International Organization for Biological Control, IOBC*), che nel 1959 coniò il termine di Controllo Integrato (*Integrated Pest Management, IPM*) (Rossi et al., 2012).

Lo sviluppo di sistemi di produzione più sostenibili, meno intensivi e più integrati è ormai un obiettivo fondamentale dell'agricoltura moderna. Le finalità principali di questi sistemi sono quelli di mantenere una buona produzione, sia in termini qualitativi che quantitativi, di preservare o aumentare il reddito aziendale e di ridurre il più possibile gli impatti ambientali negativi. La riduzione dell'utilizzo di fertilizzanti, di prodotti fitosanitari e di risorse idriche acquisisce dunque crescente importanza (Geng et al., 1990).

A seguito del continuo approfondimento di questi sistemi si arrivò a parlare di “produzione integrata” che riguarda tutto il complesso di tematiche inerenti alla coltura, dalla gestione del suolo a quella della protezione (Figura 2).

Nel 1993, lo *IOBC* ha pubblicato la definizione di produzione integrata e stabilito i suoi obiettivi, validi per le diverse colture. Successivamente, tali obiettivi sono stati ulteriormente approfonditi ed integrati con delle linee guida specifiche per ciascuna coltura, che è possibile tuttavia, riassumere come segue:

1. promuovere dei sistemi culturali rispettosi dell'ambiente, economicamente sostenibili, e in grado di favorire anche lo sviluppo degli aspetti sociali e culturali dell'agricoltura;
2. assicurare la produzione di prodotti alimentari sani, di qualità e con il minimo residuo possibile di prodotti fitosanitari;

3. proteggere la salute degli agricoltori e degli operatori in fase di manipolazione e utilizzazione dei prodotti fitosanitari;
4. proteggere, promuovere e mantenere la biodiversità negli agroecosistemi e negli spazi circostanti;
5. favorire i metodi e le tecniche basate su meccanismi naturali;
6. conservare e promuovere la fertilità del suolo nel medio-lungo termine;
7. minimizzare l'inquinamento di acqua, aria e suolo (Caffi, Legler, and Rossi 2016)



Figura 2: L'IPM si focalizza sulla gestione delle avversità delle colture ed è parte integrante sia della produzione integrata, che riguarda tutti gli aspetti della coltura (gestione suolo, concimazioni, irrigazioni), che della coltivazione integrata che fa riferimento all'intera azienda (Da: Caffi, Legler, Rossi 2016)

La Commissione Europea, tramite la Direttiva 128/2009/EC, ha definito poi le norme per un uso sostenibile dei prodotti fitosanitari finalizzato alla riduzione dei rischi per la salute umana e per l'ambiente (European Parliament, 2009) stabilendo che gli Stati membri debbano adottare tutte le necessarie misure appropriate per incentivare una difesa fitosanitaria a basso apporto di prodotti fitosanitari (Rossi, Caffi, Legler, & Carotenuto, 2013; Caffi, Legler, & Rossi, 2016). Attualmente, nell'allegato III di tale Direttiva sono riportati gli otto principi generali della difesa integrata, che, se messi in relazione come mostrato nella figura 3, si dimostrano articolati e fondati attorno al processo decisionale (European Parliament, 2009; Rossi et al., 2012). Considerando, infatti, che la gestione integrata dei parassiti si basa su un ricorso ad approcci complementari che includono mezzi genetici, meccanici, agenti di biocontrollo, biotecnologie e tecnologie informatiche, insieme all'uso di prodotti fitosanitari quando necessari per controllare i parassiti più problematici e per gestire le situazioni critiche (Been et al., 2009) appare chiaro che il centro della gestione risiede nel processo decisionale (Caffi, Legler, and Rossi 2016).

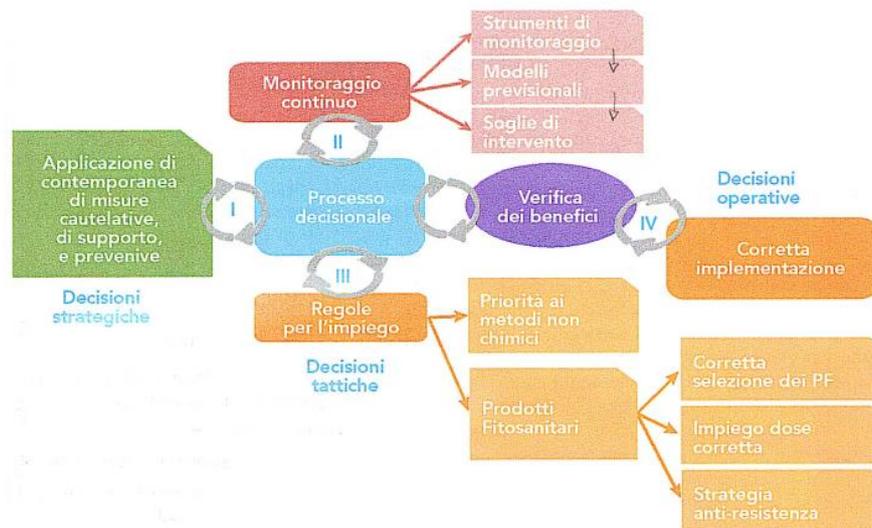


Figura 3: Diagramma della struttura necessaria all'implementazione dell'IPM, sulla base della Direttiva EC-128/2009 sull'Uso Sostenibile dei Prodotti Fitosanitari il cui cuore è il processo decisionale che coinvolge le decisioni tattiche, strategiche e operative (Da: Caffi, Legler, Rossi 2016).

Le prime decisioni da prendere sono quelle di tipo strategico; a tal proposito assumono particolare importanza le misure di prevenzione e soppressione degli organismi nocivi, quali ad esempio la scelta delle cultivar, delle forme d'allevamento, delle rotazioni colturali, la potatura e la gestione dei residui, la conduzione del suolo, la nutrizione minerale e tutte le altre pratiche colturali che mirano a un mantenimento della salute della coltivazione (Caffi et al., 2016; Rossi et al., 2012).

Un secondo tipo di processo decisionale è quello che riguarda la necessità di intraprendere azioni di difesa e il momento migliore per farlo. Ciò trova giustificazione a seguito del monitoraggio delle avversità nella coltivazione, sull'impiego di soglie d'intervento, sull'uso di modelli matematici e di sistemi di previsione scientificamente validi, nonché sul consiglio di consulenti qualificati.

Una volta concretizzata la necessità di un intervento di difesa, occorre prendere le decisioni tattiche, ossia quelle in merito alle misure di lotta da utilizzare contro i singoli parassiti e il momento ottimale di intervento. I metodi di lotta biologica, fisica o in linea generale non chimica, sono da preferire nel caso in cui possano fornire un livello di protezione soddisfacente. Se la scelta dovesse necessariamente ricadere sui prodotti di sintesi, il criterio di scelta del prodotto e la sua distribuzione si baserà su: a) specificità ed efficacia contro l'organismo da combattere; b) assenza di effetti collaterali per la salute umana, per gli organismi non bersaglio e per l'ambiente; c) minimizzazione dei quantitativi utilizzati; d) minimo rischio di sviluppo di resistenze nelle popolazioni di parassiti e malerbe e/o opportune strategie anti-resistenza per mantenere l'efficacia dei prodotti (Rossi et al., 2012; Caffi et al., 2016).

Infine, a livello operativo chi attua le operazioni di gestione deve decidere in merito ai mezzi di intervento da utilizzare, sulla loro corretta regolazione e adeguata manutenzione, nonché sul tipo di trattamento da adottare, sulla definizione dei parametri d'irrorazione ottimale e sulla verifica di distribuzione post-trattamento. La verifica post-intervento, in particolare, serve a determinare se l'operazione è stata o meno efficace, documentando i benefici per la coltura. Tale verifica è fondamentale per guidare, correggere o migliorare eventuali interventi futuri (Rossi et al., 2012, Caffi et al., 2016). I diversi tipi di decisione sopra descritti differiscono in termini di tempo e scala spaziale (Rabbinge, Rossing, & Van der Werf, 1993): le decisioni strategiche interessano una scala temporale ampia, talvolta di anni e interessano sia l'azienda agricola nella sua interezza (es. rotazione delle colture) sia la sola coltura (es. scelta della varietà); la gestione tattica invece, avviene giorno per giorno, in risposta a ciò che accade a livello di coltura; le decisioni operative richiedono una risposta rapida, talvolta in termini di minuti, a eventi imprevisti che interessano la coltura (es. la decisione di posticipare un'applicazione di prodotti fitosanitari a causa del vento). Quindi, le attività aziendali a livello strategico, tattico e operativo che spesso non coincidono temporalmente, combinate con le caratteristiche proprie della gestione integrata, caratterizzata da processi dinamici e che richiedono un'organizzazione e una gestione attenta e dettagliata, rendono l'applicazione dell'*IPM* più complicata rispetto alla gestione tradizionale (Conway, 1984).

Rispetto ai processi decisionali relativi ad altre attività economiche, quelli che interessano la protezione delle colture hanno ricevuto poca attenzione e poco approfondimento (Eom e Kim, 2006) tuttavia, una migliore comprensione del processo decisionale è imprescindibile per una buona gestione della difesa integrata.

È chiaro, pertanto, che interventi rispondenti alla direttiva e all'*IPM*, possono essere messi in pratica solo se i decisori sono adeguatamente supportati, attraverso un accesso continuativo a informazioni relative allo stato fisiologico, nutrizionale e idrico della coltura, attraverso l'aggiornamento sui mezzi tecnici, caratteristiche e limitazioni d'impiego, condizioni ambientali, situazione delle coltivazioni e presenza ed evoluzione di insetti e malattie. Per questo motivo, nella Direttiva 128 viene stabilito che gli Stati membri debbano provvedere *“affinché gli utilizzatori professionali dispongano di informazioni e di strumenti per il monitoraggio delle specie nocive e l'assunzione di decisioni, nonché di servizi di consulenza sulla difesa integrata”*.

Per rispondere a queste indicazioni, i Decreti Legislativi attuativi della Direttiva del 14 agosto 2012 e del 22 gennaio 2014 (adozione del Piano di Azione Nazionale per l'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari), nell'ambito della difesa integrata obbligatoria, stabiliscono che gli

utilizzatori professionali dei prodotti fitosanitari e le aziende agricole devono disporre direttamente o avere accesso: a dati meteorologici dettagliati del territorio di interesse, a dati fenologici e fitosanitari forniti da una rete di monitoraggio e, ove disponibili, ai sistemi di previsione e avvertimento basati sui modelli matematici; a eventuali bollettini territoriali di difesa integrata per le principali colture e infine ad ogni materiale informativo per l'applicazione della difesa integrata (Rossi et al., 2012).

Appare quindi evidente come in un'ottica di difesa integrata sia necessario investire nella gestione e nella pianificazione aziendale, nella raccolta dei dati e nella tenuta dei registri, nell'identificazione delle competenze richieste e nell'offerta di una formazione adeguata a garantire un funzionamento sicuro della coltura.

In aggiunta, il responsabile della decisione deve essere fornito di strumenti adeguati, ad esempio per identificare i valori soglia che giustificano un intervento, deve avere accesso agli ultimi dati ed aggiornamenti provenienti dalla ricerca e deve sapere come ottenere il supporto e l'aiuto di esperti qualificati (EISA, 2001).

Emerge, quindi, l'importanza di poter ricorrere a degli strumenti adeguati ad aiutare l'agricoltore a mettere in pratica quanto richiesto dalla Direttiva alle colture di interesse (Rossi et al., 2012); tra questi vi sono: i) servizi di avviso; ii) dispositivi on-site; e iii) sistemi di supporto alle decisioni (*DSS*). Questi tre tipi di strumenti lavorano su scale spaziali e temporali diverse e possono essere forniti agli utenti sia da enti pubblici che privati.

Nel caso dei servizi di allerta sono generalmente offerti agli agricoltori dai servizi di divulgazione o da altre agenzie pubbliche, gratuitamente o dietro pagamento di una tassa di accesso e, nella maggior parte dei casi le informazioni sono fornite: i) per un gruppo di agricoltori e senza considerare le peculiarità di ciascuna azienda o le specifiche condizioni ambientali e colturali; ii) a scala regionale per aree omogenee; e iii) a intervalli di tempo fissi con aggiornamenti giornalieri o settimanali.

I primi servizi di allerta hanno iniziato a diffondersi negli anni '70: BLITECAST offriva un servizio di allerta per la peronospora della patata nel 1975 e per la ticchiolatura dell'olivo nel 1980 ed è considerato il precursore dei sistemi di allerta più avanzati, sviluppati per altre colture tra cui pomodoro (TOM), vite (GrapES), grano (CONSELLOR), pesco (CALEX) e melo (POMME) (Agrios, 2005).

In Italia, i servizi di allerta sono normalmente forniti a livello regionale e, al giorno d'oggi, gli avvisi forniti si fondano su linee guida *IPM* predefinite e sulla valutazione del rischio ambientale da parte di modelli. Ciò avviene, ad esempio, nella Regione Emilia-Romagna, dove il servizio Fitosanitario Regionale gestisce il servizio "previsione e avvertimento" con la

collaborazione di tecnici esperti e ricercatori di Università presenti sul territorio (Rossi, Ponti, & Cravedi, 2000).

Il secondo tipo di strumenti, quello afferente alla categoria dei servizi *on-site*, fornisce informazioni a livello di azienda agricola o di parcella mediante approcci unidirezionali e a spina (Rossi et al., 2012). Questi dispositivi di solito incorporano modelli per colture, malattie o parassiti specifici e sensori che raccolgono i dati di *input* del modello e producono *output* specifici per il sito in cui si trova il dispositivo.

Questi modelli sono tipicamente tratti dalla letteratura e mancano di una convalida o di una calibrazione specifica per le condizioni locali in cui il dispositivo viene collocato. Questi dispositivi elettronici sono apparsi sul mercato negli anni '80. In Italia, dispositivi come AGREL, BIOMETRON SWG, MTX WST 4000 e SIAP 3800 permettevano la previsione delle infezioni di peronospora della vite e ticchiolatura del melo (Mandrioli, Brunelli, & Veronesi, 1985), (Rossi et al., 2012).

Alcuni di questi dispositivi trasmettono dati meteorologici ai server gestiti da fornitori e permettono agli agricoltori di accedere sia ai dati registrati che ai risultati dei modelli dei parassiti tramite un apposito sito *web* (ad esempio quelli di Pessl Instruments, <http://pessl.metos.at>, o Dacom, www.dacom.nl).

Normalmente, i servizi *on-site* sono commercializzati da aziende private, spesso da quelle che vendono stazioni meteorologiche per l'agricoltura.

Infine, vi sono i sistemi di supporto alle decisioni (*DSS*) una classe specifica di sistemi informatici computerizzati che supportano le attività decisionali. I *DSS* raccolgono, organizzano e integrano tutti i tipi di informazioni necessarie per la gestione di diverse colture; analizzano e interpretano le informazioni e infine utilizzano l'analisi per raccomandare le scelte di azione o di intervento più appropriate (Agrios, 2005). Conoscenze specialistiche, modelli matematici e dati tempestivi sono elementi chiave dei *DSS* e vengono utilizzati per assistere i produttori sia nelle decisioni operative quotidiane sia in quelle strategiche a lungo termine (Sonka et al., 1997). I *DSS* hanno il potenziale per essere strumenti importanti nel processo decisionale degli agricoltori e dei loro consulenti grazie alla possibilità di includere tutti i requisiti per l'attuazione pratica della difesa integrata (Ritchie, 1995).

4.2.4 *DSS nelle strategie di difesa: stato dell'arte*

I *DSS* possono fornire agli utenti informazioni sul rischio di parassiti delle piante, mettendo a disposizione degli agricoltori conoscenze scientifiche e algoritmi razionali di gestione del rischio (Gent et al., 2011; Hochman & Carberry, 2011). L'importanza di questi strumenti è

aumentata costantemente a partire dagli anni '80 e un gran numero di *DSS* sono stati sviluppati per assistere consulenti e agricoltori nella gestione integrata delle colture. Nel decennio successivo, con l'aumento della diffusione dei computer e della connessione internet, la Comunità Europea ha favorito programmi di ricerca e sviluppo per aumentare l'utilizzo delle tecnologie informatiche in un'ottica di gestione agricola razionale (Meijer & Kamp, 1991; Secher, 1993; Caffi, Legler, and Rossi 2016).

Una rassegna dei *DSS* attualmente disponibili per la protezione delle colture in Europa è stata condotta nel 2008 nell'ambito del progetto ENDURE.

Questa revisione ha preso in esame 70 *DSS* attualmente disponibili in Europa, selezionati sulla base di quattro criteri di ammissibilità: i) valutazione di soglie economiche e/o raccomandazione di opzioni di trattamento; ii) integrazione di varie fonti di informazione; iii) uso di algoritmi decisionali e/o modelli di calcolo; e iv) uso di computer. L'indagine ha classificato i *DSS* selezionati nei seguenti gruppi (la somma dei record è superiore a 70, perché alcuni sistemi considerano più di un'avversità): malattie delle colture orticole e frutticole (18); malattie dei seminativi (37); parassiti (18); erbe infestanti (9).

Nonostante il numero di *DSS* prodotti sia elevato, essi hanno generalmente offerto poco all'agricoltura pratica e, rispetto al numero totale, solo pochi sono utilizzati abitualmente (Nguyen, Wegener, & Russell, 2005; Matthews et al., 2008; Gent et al., 2011).

Sebbene gli agricoltori desiderino una maggiore capacità di risolvere o evitare i problemi e l'incertezza nel processo decisionale della difesa, i *DSS* sono tra i mezzi meno richiesti per raggiungere questo obiettivo (Stone & Hochman, 2004), la loro adozione è stata piuttosto debole, con un numero di utenti che varia da pochi appassionati fino ad appena il 3% del numero di agricoltori professionisti in un singolo Paese (DCA, 2012) e l'uso principale è indiretto facendo perno su consulenti agricoli (ENDURE, 2008).

Tra le ragioni dello scarso successo dei *DSS* in agricoltura analizzate in precedenza, è importante sottolineare come soprattutto il tempo richiesto agli utenti può essere il fattore più importante per il successo o il fallimento di un intervento di difesa. Le decisioni in merito alla difesa delle colture sono spesso urgenti e non possono essere rimandate e molti sistemi non rispettano gli intervalli di tempo utilizzati dai coltivatori per prendere le decisioni (Matthews et al., 2008; McCown et al., 2009).

La quantificazione dei benefici economici derivanti dall'uso dei *DSS* e in particolare dal loro uso nelle strategie di difesa è stata stimata in via prudenziale, in riferimento alla gestione dell'oidio e della peronospora in viticoltura. È emerso che l'utilizzo di un *DSS* nella strategia di difesa può portare alla riduzione del 30% delle applicazioni di prodotti fitosanitari; dato che

l'applicazione convenzionale di prodotti fitosanitari per il controllo di queste malattie costa circa 500 €/ha all'anno, un *DSS* può ridurre i costi di 150 €/ha all'anno (Caffi, Rossi, & Bugiani, 2010; Caffi, Legler, Rossi, & Bugiani, 2012).

Tuttavia, i costi agricoli vengono gestiti in modo più efficace riducendo gli *input* di produzione, acquistando fattori di produzione più economici e semplificando le operazioni agricole piuttosto che attraverso applicazioni estese dei *DSS* rendendo il beneficio economico apportato da tali sistemi secondario (Kuhlmann & Brodersen, 2001). Piuttosto che valutare i *DSS* in base ai benefici economici immediati, risulta più significativa la valutazione in termini di sostenibilità complessiva, cioè in termini di sostenibilità economica, ambientale e sociale. In questo senso, i vantaggi derivanti dall'utilizzo di un *DSS* sono molteplici, in quanto consentono di: i) mantenere la base di risorse naturali dell'azienda agricola per la futura produzione di colture; ii) gestire meglio le risorse riducendo l'utilizzo di prodotti fitosanitari e migliorando la qualità del prodotto finale; iii) dimostrare ai clienti e alla comunità in generale le buone prestazioni ambientali; iv) soddisfare le aspettative dell'industria, della comunità e dei governi in materia di gestione ambientale; v) mantenere o ottenere l'accesso a determinati mercati, in particolare a quelli con elevati standard di qualità del prodotto e/o di sicurezza ambientale. Tuttavia, non è facile quantificare tutti questi vantaggi economici legati alla sostenibilità.

In Italia i più autorevoli modelli per la protezione delle colture sono stati sviluppati dal Gruppo di lavoro del Prof. Rossi, nell'ambito di Horta srl, la già menzionata azienda nata come *spin off* dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza.

In questi sistemi ogni patogeno o insetto parassita ha in genere un modello proprio che prende in esame i seguenti parametri: i) valori meteo; ii) sviluppo della coltura; iii) rischio d'attacco del parassita; iv) scelta dei prodotti antiparassitari; v) scelta della dose ottimale; e vi) efficacia della protezione.

I modelli vengono via via implementati e aggiornati in stretta collaborazione con gli autori dei modelli stessi, a garanzia della corrispondenza fra il modello originale e quello operativo. Essi vengono altresì costantemente validati in differenti e nuovi areali o in specifiche sperimentazioni condotte dagli autori o tramite il rilascio di versioni prototipo affidate ad utenti particolarmente attenti e competenti.

Inoltre, questi *DSS* offrono all'utente un ruolo di partecipazione attiva tramite un processo di trasferimento di informazioni mediato dal computer, consentendo all'utente di interagire attivamente attraverso finestre di monitoraggio dei dati osservati in campo, così da ricalibrare le notifiche sulla base di queste integrazioni. Queste interazioni, di tipo registrativo, sono

particolarmente importanti in quanto danno l'opportunità al tecnico di inserire e aggiornare contenuti ai quali il sistema replica in modo adattativo.

4.3 Bibliografia

- Agrios, G. N. (2005). Plant Disease Epidemiology. In *Plant Pathology* (5th ed., p. 289). Elsevier Academic Press.
- Ascough II, J. C., McMaster, G. S., Dunn, G. H., & Andales, A. A. (2010). The GPFARM DS for agroecosystem sustainability: the past, future, and lessons learned. In *Environmental Modeling International Conference Proceedings. International Modeling and Environmental Software Society, Modelling for Environment's Sake* (pp. 2540–2547). Ottawa, Canada: Swayne, D.A., Yang, W., Voinov, A.A., Rizzoli A., Filatova, T.
- Atkins, P., Simmons, I., & Roberts, B. (1998). The Origins and Spread of Agriculture. In H. Arnold (Ed.), *People, Land and Time*. London. <https://doi.org/10.4324/9780203765777-10>
- Been, T., Berti, A., Evans, N., Gouache, D., Gutsche, V., Jensen, E. J., ... Rydahl, P. (2009). *Review of New Technologies Critical to Effective Implementation of Decision Support Systems (DSS's) and Farm Management Systems (FMS's)*.
- Bertoglio, R., Corbo, C., Renga, F. M., & Matteucci, M. (2021). The Digital Agricultural Revolution: A Bibliometric Analysis Literature Review. *IEEE Access*, 9, 134762–134782. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115258>
- Boller, E. F., Avilla, J., Joerg, E., Malavolta, C., Wijnands, F. G., & Esbjerg, P. (2004). *Integrated production: principles and technical guidelines. Bulletin OILB/SROP* (3rd Editio).
- Caffi, T., Legler, S. E., & Rossi, V. (2016). L'applicazione dei sistemi di supporto alle decisioni nella moderna difesa integrata delle colture. In Edagricole-New Business Media (Ed.), *Difesa sostenibile delle colture* (pp. 171–190). Bologna: Battilani, P.
- Caffi, T., Legler, S. E., Rossi, V., & Bugiani, R. (2012). Evaluation of a Warning System for Early-Season Control of Grapevine Powdery Mildew. *Plant Disease*, 96(1), 104–110.
- Caffi, T., Rossi, V., & Bugiani, R. (2010). Evaluation of a Warning System for Controlling Primary Infections of Grapevine Downy Mildew. *Plant Disease*, 94(6), 709–716.

- Chandra, A., McNamara, K. E., & Dargusch, P. (2018). Climate-smart agriculture: perspectives and framings. *Climate Policy*, *18*(4), 526–541. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1316968>
- Conway, G. R. (1984). *Pest and Pathogen Control. Strategic, Tactical and Policy Models. International Series on Applied System Analysis*. John Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1177/003072708501400130>
- EISA. (2001). A Common Codex for Integrated Farming. Retrieved July 3, 2022, from <http://ec.europa.eu/environment/archives/ppps/pdf/ilubrochure.pdf>
- European Commission. (2009). *Development of guidance for establishing Integrated Pest Management (IPM) principles*.
- European Parliament. (2009). Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. *Official Journal of the European Union*, *309*.
- Geng, S., Hess, C. E., & Auburn, J. (1990). Sustainable Agricultural Systems: Concepts and Definitions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *165*(2–3), 73–85. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1990.tb00837.x>
- Gent, D. H., De Wolf, E., & Pethybridge, S. J. (2011). Perceptions of risk, risk aversion, and barriers to adoption of decision support systems and integrated pest management: An introduction. *Phytopathology*, *101*(6), 640–643. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-10-0124>
- Gorry, G. A., & Morton, M. S. S. (1971). A framework for management information systems. *Sloan Management Review*, *13*(June), 55–70. Retrieved from <http://mis.njit.edu/ullman/cis465/Articles/gorry.pdf>
- Hochman, Z., & Carberry, P. S. (2011). Emerging consensus on desirable characteristics of tools to support farmers' management of climate risk in Australia. *Agricultural Systems*, *104*(6), 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.03.001>
- Igbaria, M., & Guimaraes, T. (1994). Empirically Testing the Outcomes of User Involvement in DSS Development. *Omega*, *22*(2), 157–172.
- Jones, V. P., Brunner, J. F., Grove, G. G., Petit, B., Tangren, G. V., & Jones, W. E. (2010). A web-based decision support system to enhance IPM programs in Washington tree fruit. *Pest Management Science*, *66*(6), 587–595. <https://doi.org/10.1002/ps.1913>

- Keen, P. G. W. (1980). *Decision Support Systems: a research perspective*. Center for Information System Research.
- Keen, P. G. W., & Morton, M. S. S. (1978). *Decision support systems : an organizational perspective*. (Addison-Wesley, Ed.).
- Kerr, D. (2004). Factors influencing the development and adoption of knowledge based decision support systems for small, owner-operated rural businesses. *Artificial Intelligence Review*, 22(2), 127–147.
- Kuhlmann, F., & Brodersen, C. (2001). Information technology and farm management: Developments and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1–3), 71–83. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00157-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00157-5)
- Legler, S. E., & Rossi, V. (2016). Prevedere e gestire il rischio fitosanitario. *VigneVini*, 1, 21–23.
- Magarey, R. D., Travis, J. W., Russo, J. M., Seem, R. C., & Magarey, P. A. (2002). Decision support systems: Quenching the thirst. *Plant Disease*, 86(1), 4–14. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.1.4>
- Maloy, O. C. (1993). *Plant disease control : principles and practice*. New York, USA: Wiley.
- Mandrioli, P., Brunelli, A., & Veronesi, G. (1985). Electronic devices for disease forecasting in Italy. *Informatore Fitopatologico*, 35(10), 11–17.
- March, J. M. (1994). *A Primer On Decision Making: How Decisions Happen*. New York, USA: Free Press.
- Matthews, K. B., Schwarz, G., Buchan, K., Rivington, M., & Miller, D. (2008). Wither agricultural DSS? *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.11.001>
- McCown, R. L. (2002). *Changing systems for supporting farmers' decisions: Problems, paradigms, and prospects*. *Agricultural Systems* (Vol. 74). [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00026-4)
- McCown, R. L. (2012). A cognitive systems framework to inform delivery of analytic support for farmers' intuitive management under seasonal climatic variability. *Agricultural Systems*, 105(1), 7–20. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.08.005>

- McCown, R. L., Carberry, P. S., Hochman, Z., Dalglish, N. P., & Foale, M. A. (2009). Re-inventing model-based decision support with Australian dryland farmers. 1. Changing intervention concepts during 17 years of action research. *Crop and Pasture Science*, *60*(11), 1017–1030. <https://doi.org/10.1071/CP08455>
- McCown, R. L., Hochman, Z., & Carberry, P. S. (2002). Probing the enigma of the decision support system for farmers: Learning from experience and from theory. *Agricultural Systems*, *74*(1), 1–10.
- Meijer, B. J. M., & Kamp, J. A. L. M. (1991). Development and introduction of crop management systems. *Danish Journal of Plant of Soil Science*, *85*, 207–216.
- Mintzberg, H. (1979). The structure of “Unstructured” Decision Process. *Acta Psychiatr Scand.* Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=474170
- Mitra, A., Bapala, A., & Mohanty, S. P. (2022). Everything you wanted to know about Smart Agriculture. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, *5*(3). <https://doi.org/10.1109/MCE.2016.2556879>
- Moore, J. H., & Chang, M. G. (1980). Design of Decision Support Systems. *ACM SIGMIS Database*, *12*(1–2), 8–14. <https://doi.org/10.1145/1017654.1017658>
- Nguyen, N. C., Wegener, M., & Russell, I. (2005). Decision support systems in Australian agriculture : state of the art and future development. *AFBM Journal*, *4*(1–2), 15–21.
- Parker, C. G., & Campion, S. (1997). Improving the uptake of decision support systems in agriculture. In I. Thysen & A. R. Kristensen (Eds.), *Proceedings of First European Conference for Information Technology in Agriculture* (pp. 129–134). Copenhagen, Denmark.
- Power, D. J. (2002). *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Manager*. London, UK: Quorum Books.
- Rabbinge, R., Rossing, W. A. H., & Van der Werf, W. (1993). Systems approaches in epidemiology and plant disease management. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, *99*(3 Supplement), 161–171. <https://doi.org/10.1007/BF03041406>

- Rashidi, M., Ghodrati, M., Samali, B., Kendall, B., & Zhang, C. (2017). Remedial modelling of steel bridges through application of analytical hierarchy process (AHP). *Applied Sciences*, 7(2), 20. <https://doi.org/10.3390/app7020168>
- Rashidi, M., Ghodrati, M., Samali, B., & Mohammadi, M. (2018). Decision support systems. In *Management on Information Systems* (pp. 461–472). <https://doi.org/10.1177/0193841x8500900105>
- Ritchie, J. T. (1995). International consortium for agricultural systems applications (ICASA): Establishment and purpose. *Agricultural Systems*, 49(4), 329–335. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(95\)00028-4](https://doi.org/10.1016/0308-521X(95)00028-4)
- Rossi, V., Caffi, T., Legler, S. E., & Carotenuto, E. (2013). Sistemi di supporto alle decisioni nella difesa del vigneto. In Edagricole-New Business Media (Ed.), *Agricoltura sostenibile. Principi, sistemi e tecnologie applicate all'agricoltura produttiva per la salvaguardia dell'ambiente e la tutela climatica* (pp. 493–507). Bologna: Pisante, M.
- Rossi, V., Caffi, T., Legler, S. E., Carotenuto, E., & Bigot, G. (2014). Applicazione su larga scala del Sistema di Supporto alle Decisioni vite.net per la viticoltura sostenibile. *ATTI Giornate Fitopatologiche, 1*, 283–288.
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rossi, V., & Legler, S. E. (2019). DSS, il volto utile dell'evoluzione digitale. *Terraevita*, 2, 30–35.
- Rossi, V., Onesti, G., Legler, S. E., & Caffi, T. (2015). Use of systems analysis to develop plant disease models based on literature data: grape black-rot as a case study. *European Journal of Plant Pathology*, 141(3), 427–444. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0553-z>
- Rossi, V., Ponti, I., & Cravedi, P. (2000). The status of warning services for plant pests in Italy. *EPPO Bulletin*, 30(1), 19–29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2000.tb00845.x>

- Rossi, V., Salinari, F., Poni, S., Caffi, T., & Bettati, T. (2014). Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems: The example of vite.net. *Computers and Electronics in Agriculture*, *100*, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.011>
- Sage, A. P. (1991). *Decision Support Systems Engineering*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Secher, B. J. M. (1993). European Network for development of operational and tactical decision support systems for crop protection in agricultural crops. In *Proceedings of the Workshop on Computer-based DSS on Crop Protection* (pp. 3–4). Parma, Italy.
- Sonka, S. T., Bauer, M. E., Cherry, E. T., Colburn, J. W. J., Hemlich, R. E., Deborah, A. J., & Leboeuf, J. B. (1997). *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Sousa, P. A. C., Pimentao, J. P., & Ribeiro, R. A. (2006). Intelligent decision support tool for prioritizing equipment repairs in critical/disaster situation. In F. Adam, P. Brezillon, S. Carlsoon, & P. Humphrey (Eds.), *Creativity and Innovation in Decision Making and Decision Support* (pp. 803–816). London, UK: Decision Support Press.
- Sprague, R. H., & Carlson, E. D. (1982). *Building Effective Decision Support Systems*. Grolier.
- Stone, P., & Hochman, Z. (2004). If interactive decision support systems are the answer, have we been asking the right questions? In *New directions for a diverse planet. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*. Brisbane, Australia.
- Trendov, N., Varas, S., & Meng, S. (2019). *Digital technologies in agriculture and rural areas - Status report. Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/ca4985en/ca4985en.pdf>
- Vercellis, C. (2009). *Business Intelligence: Data Mining and Optimization for Decision Making. Business Intelligence: Data Mining and Optimization for Decision Making*. <https://doi.org/10.1002/9780470753866>
- Zadoks, J. C. (1984). A Quarter Century of Disease Warning, 1958-1983. *Plant Disease*, *68*(4), 352. <https://doi.org/10.1094/pd-69-352>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *170*(August 2019), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>

CAPITOLO 5 - UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLA GESTIONE DELL'OLIVETO: OLIVO.NET

Nella parte introduttiva della Tesi sono state messe in evidenza le principali criticità e i profondi cambiamenti che la filiera olivicolo-olearia sta affrontando. Lo sviluppo dell'aggregazione dei diversi attori e comparti della filiera olivo, i nuovi modelli olivicoli e le nuove forme di meccanizzazione delle operazioni colturali stanno modificando radicalmente il settore olivicolo (Cola & Sarnari, 2020; Sardone et al., 2021).

In questo quadro complesso, vi è la necessità non soltanto di maggiore innovazione tecnica e tecnologica, ma anche di più approfondite conoscenze e competenze rispetto al passato per affrontare le nuove sfide e l'evoluzione che il processo decisionale ha assunto nell'ultimo decennio.

Come già ampiamente dimostrato dal successo commerciale ottenuto in altre filiere produttive, come ad esempio in viticoltura, anche nel caso dell'olivicoltura i sistemi di supporto alle decisioni (*DSS*) potrebbero rappresentare lo strumento più idoneo per far fronte alla complessità delle scelte che gli agricoltori sono tenuti ad affrontare (Rossi et al., 2012).

Proprio allo scopo di fornire agli operatori del settore un supporto innovativo per una gestione sostenibile dell'oliveto, Horta, a partire dal 2015, combinando una serie di funzionalità innovative, ha realizzato il *DSS* olivo.net, che ha visto la collaborazione del Consorzio Olivicolo Italiano, UNAPROL, e delle principali Università ed esperti italiani del settore (Anselmi et al., 2017).

Tale strumento, in continuo sviluppo, è nato con l'ambizione di arrivare in maniera diretta e/o indiretta a tutta la compagine sociale delle Organizzazioni dei Produttori (OP) UNAPROL nonché gestire la produzione da un punto di vista quali-quantitativo ai fini della commercializzazione del prodotto attraverso le OP. Ad oggi, il sistema ha già raggiunto un discreto livello operativo, e anche se presenta numerosi aspetti migliorabili dal punto di vista della difesa fitosanitaria, risulta essere un valido strumento per la gestione integrata dell'olivicoltura.

È dalla collaborazione nella realizzazione di tale piattaforma, per me palestra di conoscenze e applicazioni propedeutiche al mio Dottorato, che sono state delineate le ricerche relative alla

mia Tesi. Dopo aver evidenziato le più rilevanti necessità emergenti nel settore olivicolo, l'obiettivo è stato proprio quello di sviluppare nuovi strumenti, e in taluni casi nuovi modelli previsionali che potessero accrescere e completare il *DSS* olivo.net, per fornire un supporto ancora più rispondente alle evenienze odierne e attuali.

Ciò è stato fatto in particolare fornendo, durante il primo anno della mia attività di Dottorato, assistenza diretta agli utilizzatori del sistema olivo.net

Tale attività mi ha permesso di conoscere a fondo il sistema e gli utilizzatori finali, evidenziando le criticità e sperimentando in prima persona le necessità di implementazione.

In particolare, alla fine di questa attività è emersa l'esigenza di porre l'attenzione principalmente sulla gestione fitosanitaria della coltura in quanto, come evidenziato anche nei capitoli precedenti, ancora interessata da rilevanti criticità e divari conoscitivi. In riferimento a ciò, in sinergia e in relazione con le altre funzionalità, abbiamo inteso integrare la piattaforma olivo.net con tre moduli dedicati alla difesa sostenibile contro altrettanti importanti patogeni dell'olivo, e precisamente: *Colletotrichum spp.*, agenti dell'antracnosi e *Venturia oleaginea*, agente dell'occhio di pavone, tra i parassiti fungini; *Xylella fastidiosa*, agente del cosiddetto "complesso del disseccamento rapido dell'olivo", tra i patogeni batterici. Riguardo a quest'ultimo, per il quale non si conosce ancora una lotta efficace diretta al batterio, ci si è rivolti al controllo del suo principale vettore, *Philaenus spumarius*. Il lavoro svolto sui tre moduli è stato poi completato da una *web-app stand-alone*, per la taratura degli atomizzatori e delle irroratrici ed atta ad ottimizzare i trattamenti e il controllo di tutti i patogeni, compresi quelli sopra citati.

Per meglio definire il contesto, il presente capitolo è dedicato alla descrizione del sistema olivo.net, sistema all'interno del quale andranno ad integrarsi i lavori oggetto della mia Tesi di Dottorato, dando un preliminare quadro della sua architettura e delle sue principali peculiarità.

5.1 Olivo.net: struttura e funzioni

Il processo decisionale, come descritto nel capitolo quattro, è basato sulle informazioni e, specialmente quando le decisioni devono essere prese rapidamente, le variabili o le soluzioni sono incerte, il processo decisionale è intuitivo piuttosto che strutturato, cioè non vengono valutate ed analizzate tutte le possibili alternative (Rossi et al., 2012).

È chiaro, pertanto, che interventi rispondenti alla Direttiva UE 128/2009 possono essere messi in pratica solo se i decisori sono adeguatamente supportati, attraverso un accesso continuativo a informazioni relative allo stato fisiologico, nutrizionale e idrico della coltura, attraverso

l'aggiornamento sui mezzi tecnici, caratteristiche e limitazioni d'impiego, sulle condizioni ambientali, sulla situazione delle coltivazioni e sulla presenza ed evoluzione di insetti parassiti e malattie.

Olivo.net si inserisce in questo processo con l'obiettivo di migliorare la redditività economica della coltura attraverso una migliore gestione delle risorse e la riduzione di alcuni input, incontrando le aspettative dell'industria, della comunità e dei governi in materia di gestione ambientale e aiutando gli olivicoltori ad agire in accordo con la Direttiva 128/2009.

Per evitare i problemi tecnici che ostacolano l'implementazione da parte degli utenti agricoli di tali sistemi e sulla base dell'esperienza maturata da Horta nel corso degli anni in diverse filiere, il DSS è stato sviluppato i) considerando l'olivicoltura in maniera olistica; ii) rendendo la raccolta dei dati flessibile e automatica rispetto agli input dell'utente; iii) utilizzando una nuova generazione di modelli, meccanicistici, dinamici, validati e adatti allo scopo; iv) utilizzando un'interfaccia user-friendly e informazioni complete e di facile comprensione; v) fornendo il sistema attraverso un browser web in modo da consentire un aggiornamento continuo e un accesso flessibile (Rossi et al., 2010; Rossi et al., 2014)

Inoltre, per affrontare i problemi legati all'accettazione da parte dell'utente finale il sistema fornisce informazioni sia con sistemi "*push*" che "*pull*" e non si pone come sostituto del decisore, ma come supporto al processo decisionale, coinvolgendo i potenziali utenti durante il processo di miglioramento del sistema stesso (Rossi et al., 2014).

Quest'ultimo punto è fortemente dimostrato dal fatto che la realizzazione della prima versione di olivo.net ha richiesto due anni (2015-2017) ed ha visto la collaborazione di oltre 170 tecnici e delle Organizzazioni di Produttori (OP) afferenti ad UNAPROL, presenti su tutto il territorio nazionale, permettendo così di fornire assistenza tecnica qualificata ad un numero elevato di aziende olivicole e di coinvolgere, durante la fase sperimentale, oltre 12.000 aziende (Anselmi et al., 2017).

Olivo.net è un sistema di supporto alle decisioni in grado di: i) raccogliere e trasferire, con un flusso continuo, diversi tipi di dati e informazioni necessarie per la gestione della coltura, attraverso un sistema integrato di sensori e altri strumenti per il monitoraggio in tempo reale dell'ambiente oliveto, quali dati climatici, edafici, relativi alle piante e alle loro malattie e ai loro fitofagi; ii) controllare, analizzare e interpretare i dati recepiti attraverso tecniche di modellistica avanzata; iii) attraverso l'applicazione *web*, restituire in tempo reale allerte e informazioni utili per decidere circa le più opportune azioni da intraprendere per affrontare i problemi della produzione olivicola in modo olistico e globale (Anselmi et al., 2017).

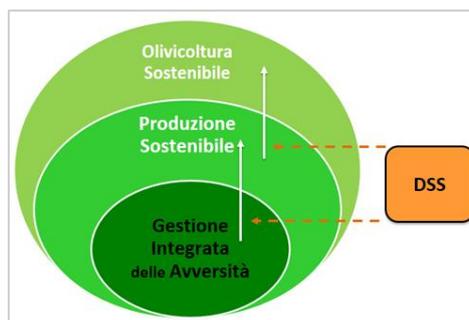


Figura 1: Rappresentazione di come il DSS interviene a più livelli nell' agroecosistema olivicolo, permettendo di attuare strategie sostenibili (Da: Anselmi et al., 2017).

Il DSS, come verrà descritto dettagliatamente nei paragrafi successivi, prende in considerazione tutti gli aspetti chiave della coltivazione dell'olivo e le rispettive interrelazioni, con un elevatissimo numero di funzioni. Ciò rende il sistema un valido alleato non solo per la gestione integrata delle avversità, ma anche nella gestione integrata della produzione (Figura 1).

Olivo.net si rivolge ai tecnici del settore come supporto decisionale in grado di integrare le esperienze e conoscenze già acquisite, e più in generale alla filiera dell'olivo di qualità con l'obiettivo di fornire indicatori di prestazione del processo produttivo. Esso può essere utilizzato come elemento aggiuntivo per la gestione delle attività istituzionali anche in contesti avanzati, già ricchi di competenze, come quelli dei servizi fitosanitari o degli uffici di assistenza tecnica delle OP. Dal punto di vista degli olivicoltori, il sistema è in grado di fornire assistenza tecnica e informazioni aggiuntive per integrare e migliorare le specifiche competenze, aiutando nell'organizzazione delle attività di monitoraggio in campo, favorendo la tracciabilità e la caratterizzazione della produzione con indicatori di sostenibilità, fornendo una guida nel processo decisionale ma senza sostituire chi è deputato a prendere le decisioni nella gestione dell'oliveto (Anselmi et al. 2017).

Olivo.net è accessibile via internet tramite qualsiasi *browser*, è disponibile 7 giorni su 7, 24 ore su 24, non richiede l'installazione di specifici programmi sul proprio computer, smartphone o tablet. Ciò garantisce un aggiornamento continuo dell'applicazione *web*, senza nessun intervento da parte dell'utente. Il DSS offre all'utente un ruolo di partecipazione attiva tramite un processo di trasferimento di informazioni mediato dal computer, che avviene attraverso finestre di monitoraggio per l'inserimento di dati osservati in campo; i dati integrati dall'utente verranno poi utilizzati dal sistema per ricalibrare le notifiche e gli allarmi.

Tutti i modelli sono normalmente implementati, e nel tempo aggiornati, in stretta collaborazione con gli autori dei modelli stessi, a garanzia della corrispondenza fra il modello originale (nella sua versione più recente) e quello operativo (Rossi et al., 2014); gli stessi

modelli vengono inoltre validati nei diversi areali olivicoli italiani e attraverso specifiche sperimentazioni condotte dagli autori. Le diverse funzioni e i differenti modelli sono integrati fra loro in una visione progettuale del sistema oliveto, che rispecchia le relazioni e interazioni dei differenti elementi dell'agroecosistema (Anselmi et al. 2017).

Tutte le informazioni sono visualizzate sotto forma di grafico sfruttando colori e simboli che permettono una comunicazione chiara, efficace ed univoca dello stato di ciascuna componente di gestione.

Olivo.net consta di quattro fasi principali di funzionamento: i) raccolta e trasferimento dei dati in flusso continuo; ii) controllo, analisi ed interpretazione dei dati ricevuti con tecniche di modellistica avanzata; iii) restituzione in tempo reale di allerte e altre informazioni utili per la decisione in merito alle azioni da intraprendere attraverso l'applicazione web, iv) intervento agronomico (Anselmi et al. 2017).

5.1.1 Infrastruttura tecnologica

Il sistema, così come quello descritto da Rossi et al. 2014 per il *DSS vite.net*, è costituito da quattro componenti principali: i) *data manager*; ii) *database* (Envi DB, Olive DB e PPP DB); iii) analisi dei dati; iv) accesso al *DSS* (Figura 2).

Il componente "*Data Manager*" gestisce la raccolta e l'archiviazione dei dati raccolti in campo e le procedure per il controllo di qualità degli stessi. Esso è costituito da cinque sottocomponenti: i) "Sensori meteo", che gestisce il flusso di dati provenienti dai sensori meteo; ii) "Strumenti di monitoraggio", che consente di inserire informazioni e dati specifici sulle colture e di gestire il flusso di dati dai dispositivi via internet iii) "*Data Receiver*", per la gestione dell'archivio di dati provenienti dai sensori e dai dispositivi portatili; iv) "*Data Loader*", che importa i dati nei database Envi DB e Olive DB; (v) "*Quality Controller*", che esegue il controllo di qualità dei dati ambientali e produce pagine HTML dinamiche, accessibili tramite Internet.

All'interno del componente "*Data Manager*" operano tre *database*: i) "*Envi DB*", che contiene dati ambientali (ad esempio, dati meteo); ii) "*Olive DB*", per le informazioni e i dati specifici della coltura e dati sulla pianta (ad esempio, crescita e sviluppo, gravità dei parassiti e delle malattie); e iii) "*PPP DB*", per le informazioni relative ai prodotti fitosanitari utilizzati in olivicoltura (ad esempio, nomi commerciali, ingredienti attivi, meccanismi d'azione).

La componente "Analisi dei dati" contiene le procedure per il calcolo dei modelli che guidano le decisioni e per la notifica degli allarmi in un *database* accessibile agli utenti attraverso la componente "Access". Essa comprende, a sua volta, quattro sottocomponenti: i) "*DSS Calc*",

contenente gli algoritmi per la produzione dell'*output*; ii) "*WFor Calc*", comprendente gli algoritmi per la generazione delle previsioni meteorologiche; iii) "*DSS DB*", che memorizza l'*output* in un *database*; iv) "*DSS Viewer*", che permette agli utenti di visualizzare l'*output* memorizzato o di avviare un nuovo calcolo dell'*output*.

Nella componente "*DSS Calc*", al fine di garantire la flessibilità per sviluppi futuri, sono previste procedure: a) di recupero dei dati dai Database Olive ed Envi; b) di calcolo, che forniscono l'*output* intermedio e finale e scrivono *file* di *log* per l'analisi di *debug* in caso di problemi; e infine (c) di memorizzazione dell'*output* finale sulla struttura dati del *DB DSS* e di fornitura dell'*output* al sottocomponente *DSS Viewer*. Tali strutture sono state sviluppate utilizzando tecnologie di servizi *web* che supportano l'interoperabilità indipendentemente dalla posizione del *database*.

Gli algoritmi per le previsioni meteorologiche che si trovano nel sottocomponente "*WFor Calc*" si basano sul *Global Forecast System* che produce, gratuitamente, previsioni meteorologiche numeriche su scala mondiale. Le previsioni numeriche del *GFS* vengono scaricate una volta al giorno e post-processate tramite un sistema *MOS (Model Output Statistics)* che chiarisce il significato delle previsioni. In dettaglio, per ogni stazione meteorologica, i dati previsionali *GFS* di temperatura e umidità relativa riferiti a un intervallo di cinque giorni vengono corretti applicando una semplice regressione lineare tra i trenta giorni di precedenti previsioni numeriche rilasciate dal modello *GFS* e i corrispondenti dati osservati della stazione meteorologica.

La componente "*Access*", infine, comprende le cartelle e le procedure necessarie per la gestione degli utenti e dei loro attributi, assicurandosi che solo le persone autorizzate abbiano accesso ai vari moduli del *DSS*.

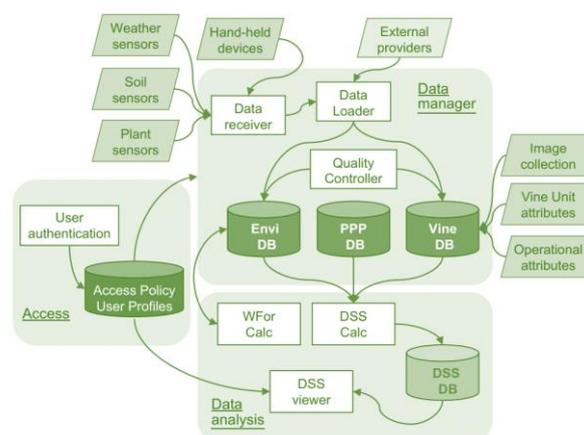


Figura 2: Componenti principali del DSS Olivo.net. Il "*Data manager*" gestisce e archivia i dati raccolti nell'oliveto da più fonti; "*Analisi dei dati*" contiene le procedure per la gestione delle previsioni meteo e il calcolo dell'*output* del DSS, questo componente archivia l'*output* in un *database* a cui gli utenti possono accedere. (Da: Rossi et al. 2014).

5.1.2 Moduli di *olivo.net*

Il primo passo previsto nell'utilizzo del sistema è la definizione delle Unità Produttive (UP) che, nel loro insieme, costituiscono l'azienda olivicola. Le UP sono, di fatto, delle unità decisionali, ossia oliveti o porzioni di oliveto che vengono gestite in modo uniforme nel corso della stagione. La definizione delle UP è lasciata all'utilizzatore in modo da tener conto dell'organizzazione aziendale e della possibilità di una gestione differenziata (per esempio, una diversa tempistica dei trattamenti fitosanitari) fra diversi appezzamenti. A oggi il *DSS* consente di definire le UP attraverso una semplice maschera d'inserimento dati e un sistema di geolocalizzazione (che consente anche la tracciatura di confini su una mappa), dove l'utente inserisce una volta, all'inizio della stagione, i principali aspetti topografici, pedologici e agronomici. Le informazioni sullo stato dell'oliveto, invece, sono dinamiche e vengono raccolte in modo asincrono; per esempio, i dati meteorologici vengono raccolti a intervalli regolari (ogni 15, 30 o 60 minuti) da stazioni meteorologiche o reti di sensori *wireless* (*WSN*), mentre gli stadi di crescita della coltura, la presenza di parassiti o malattie e le informazioni colturali svolte negli appezzamenti vengono registrati dall'utente in base al loro verificarsi (Anselmi et al. 2017). Dopo aver effettuato il *login* nel *DSS*, l'utente seleziona l'unità produttiva di interesse e visualizza una pagina principale da cui può accedere ai diversi moduli; all'interno di ogni modulo le informazioni possono essere esplorate su due livelli: informazioni sintetiche e di dettaglio.

Le informazioni sintetiche trasmettono nozioni chiave aggiornate al momento della consultazione in modo da comunicare tempestivamente il livello di allerta o lo stato del sistema; tali informazioni sono visualizzate con un approccio "*pull*" attraverso finestre contenenti elementi grafici (ad esempio, cruscotti, vasche, riquadri) che mostrano, in modo sintetico, la situazione attuale. Le informazioni approfondite mostrano in forma grafica la dinamica stagionale dell'output del modello e vengono visualizzate con un approccio "*push*" attraverso pulsanti che aprono finestre separate (Rossi et al. 2014).

Dopo aver effettuato il *login* nel *DSS*, l'utente seleziona l'unità produttiva di interesse e visualizza una pagina principale da cui può accedere ai diversi moduli; all'interno di ogni modulo le informazioni possono essere esplorate su due livelli: informazioni sintetiche e di dettaglio.

Modulo	Funzioni
Meteo	Registrazione delle principali variabili meteorologiche, con sistema automatico di controllo di qualità dei dati; Previsione meteo riferita alle singole stazioni meteorologiche; Accesso ai dati meteo in tempo reale e ai dati storici.
DSS	Modelli fenologici della coltura (scala BBCH) e di maturazione delle drupe (polifenoli e inoliazione); Modelli previsionali delle malattie occhio di pavone (<i>Venturia oleaginea</i>); Modello per il bilancio idrico a supporto dell'irrigazione; Modello per il bilancio nutrizionale a supporto della concimazione (N, P, K, Ca, Mg). Modelli previsionali integrati per la mosca (<i>Bactrocera oleae</i>); Indicatore della quantità di rame ancora disponibile per i trattamenti alla data della consultazione.
Registro delle operazioni culturali	Funzione quaderno di campagna; Funzione di verifica e controllo dei dati inseriti, per chi aderisce al disciplinare di produzione integrata volontaria; Funzione di stampa ed esportazione delle informazioni registrate.
Monitoraggio	Funzione per la pianificazione, registrazione e visualizzazione di tutte le attività di monitoraggio, dalle avversità alla fenologia e alle analisi qualitative del prodotto; Consultazione dei dati registrati, in diversi formati (file <i>csv</i> o <i>xls</i> , grafici, mappe georeferenziate).
Indicatori di sostenibilità	Differenti indicatori in grado di quantificare la sostenibilità delle scelte culturali intraprese in campo e in azienda.
Mappe tematiche	Rappresentazione spaziale geo-referenziata dei dati registrati attraverso le attività di monitoraggio e degli output dei modelli (Figura 3).
Database dei prodotti fitosanitari	Database contenente tutti i prodotti fitosanitari presenti nel mercato italiano e autorizzati per l'utilizzo in olivicoltura, sia biologica che convenzionale
Database dei prodotti fertilizzanti	Database contenente tutti i fertilizzanti reperibili sul mercato italiano e autorizzati per l'utilizzo in olivicoltura, sia biologica che convenzionale

Tabella 1 *Olivo.net*: Moduli del sistema e relative funzioni (Da: Anselmi et al. 2017)

Dopo aver effettuato il *login* nel *DSS*, l'utente seleziona l'unità produttiva di interesse e visualizza una pagina principale da cui può accedere ai diversi moduli; all'interno di ogni modulo le informazioni possono essere esplorate su due livelli: informazioni sintetiche e di dettaglio.

Le informazioni sintetiche trasmettono nozioni chiave aggiornate al momento della consultazione in modo da comunicare tempestivamente il livello di allerta o lo stato del sistema; tali informazioni sono visualizzate con un approccio "*pull*" attraverso finestre contenenti elementi grafici (ad esempio, cruscotti, vasche, riquadri) che mostrano, in modo sintetico, la situazione attuale. Le informazioni approfondite mostrano in forma grafica la dinamica stagionale dell'output del modello e vengono visualizzate con un approccio "*push*" attraverso pulsanti che aprono finestre separate (Rossi et al. 2014).

Per l'elenco di tutte le funzioni presenti nel *DSS* si rimanda alla Tabella 1; tuttavia, per illustrare come l'utente venga accompagnato nelle scelte che portano a un intervento nell'oliveto, oltre ad alcuni cenni su moduli di gestione agronomica, verrà riportata dettagliatamente la descrizione relativa al modello previsionale integrato per la mosca dell'olivo e, più sinteticamente, quella relativa all'occhio di pavone.

5.1.3 Moduli per la gestione agronomica.

Il *DSS* permette all'utente di concentrarsi sui problemi più rilevanti dell'oliveto, con un approccio olistico, incorporando soluzioni di gestione globale (Figura 4) che sono costantemente aggiornate anche sulla base degli interventi agronomici o di monitoraggio in una determinata UP e che determinano una rielaborazione degli *output* sulla base delle nuove condizioni agro-ambientali.

Per esempio, il *DSS* consente di visualizzare e tenere monitorato lo stadio di sviluppo della pianta, basato su un modello di sommatorie termiche e presentato secondo la scala BBCH (Sanz-Cortés et al., 2002), nonché l'accumulo di polifenoli e l'inolizione; tali modelli sono stati calibrati sulla base della varietà presente nell'unità produttiva e possono essere ricalibrati in seguito ai monitoraggi inseriti dall'utente.

Il modulo del contenuto idrico del terreno, invece, fa riferimento allo strato esplorato dalle radici e fornisce un *output* frutto del bilancio idrico fra ingressi, ossia precipitazioni, eventuali irrigazioni, risalita di falda, e uscite, ossia evapotraspirazione, infiltrazione e ruscellamento. Nel caso in cui in oliveto siano presenti dei sensori per la misurazione del contenuto idrico, anche posizionati a diverse profondità, l'utente sarà in grado di visualizzare tutte le misurazioni.

Un ulteriore esempio di modulo relativo agli aspetti agronomici è quello relativo alla gestione della flora infestante, in cui sono state integrate le linee guida per la gestione integrata che permette, sulla base delle caratteristiche proprie dell'UP, di definire le strategie più consone di diserbo, riducendo al minimo il ricorso a prodotti chimici.

Infine, il modello di bilancio nutrizionale provvede a calcolare i fabbisogni nutrizionali (N, P, K, Ca, Mg) considerando l'obiettivo produttivo e le caratteristiche di fertilità del suolo registrate nell'unità produttiva di riferimento. I fabbisogni vengono ripartiti su tre distinte fasi di intervento: i) entro la ripresa vegetativa; ii) fra lo sviluppo delle infiorescenze e la fine della fioritura; e iii) fra l'allegagione e lo sviluppo delle drupe. In base agli interventi di concimazione registrati nel "registro delle operazioni culturali", il sistema si aggiorna segnalando le dosi già apportate e quelle ancora da distribuire in riferimento ad ognuna delle tre fasi (Anselmi et al. 2017).

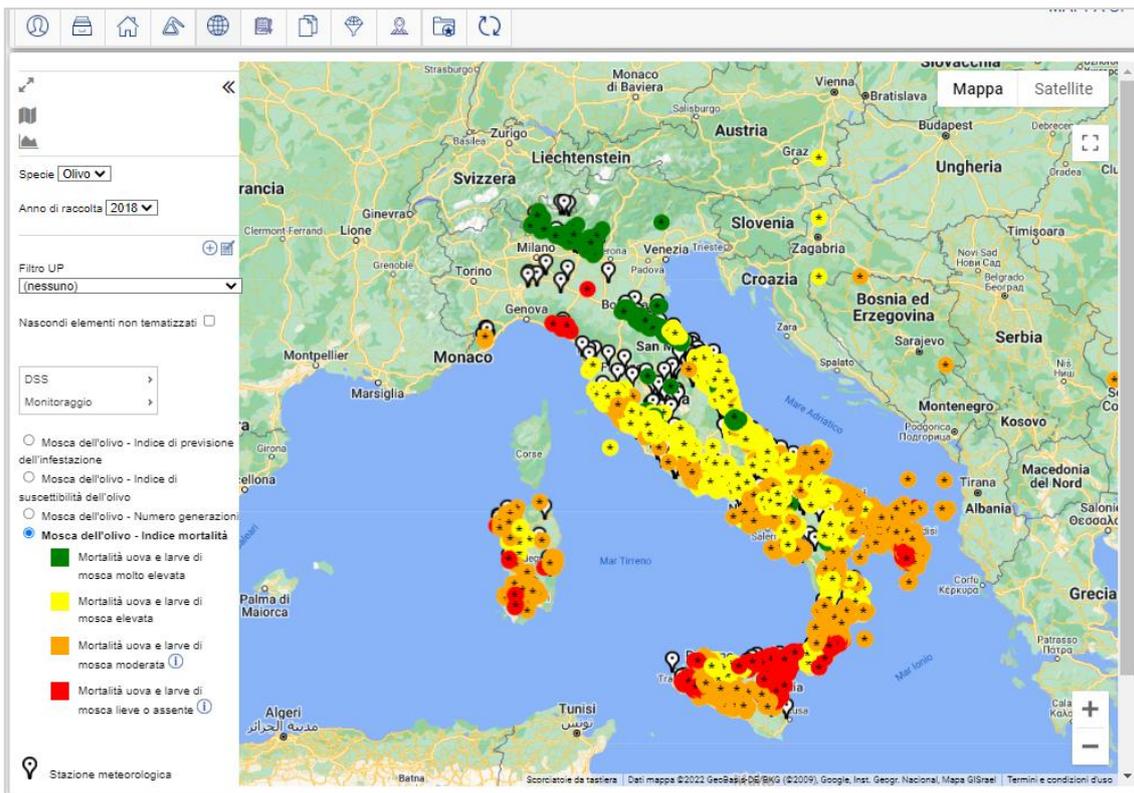


Figura 3: Esempio di mappa tematica rappresentante gli output del modello "Indice di mortalità" della mosca dell'olivo, delle singole unità produttive (vedi sotto). Mappe tematiche simili possono riguardare tutti i vari output dei modelli presenti all'interno di olivo.net

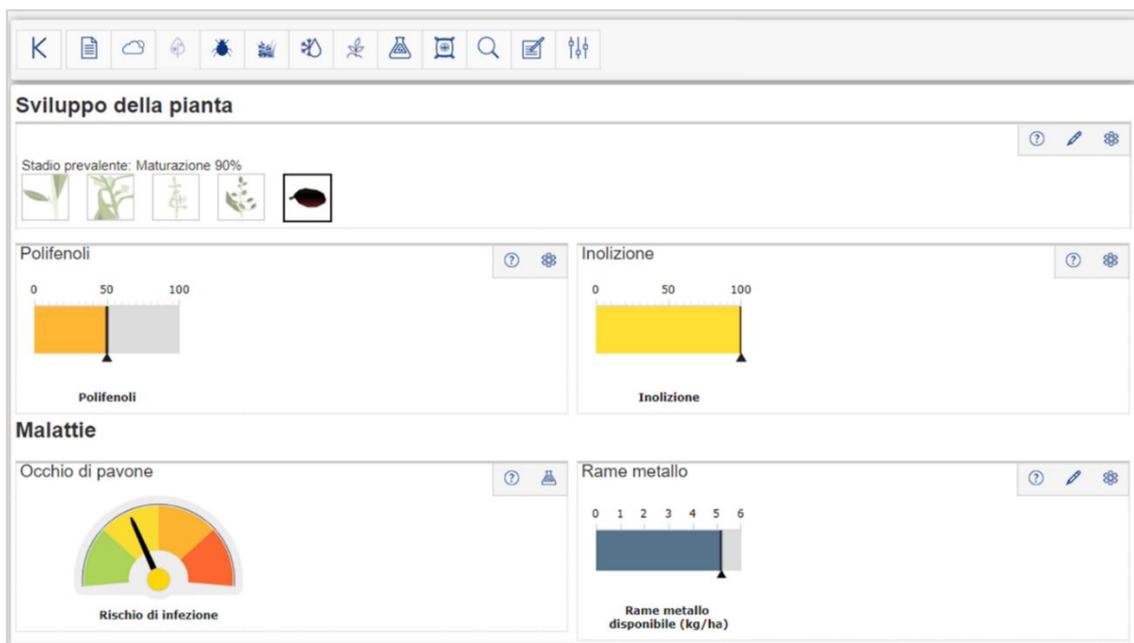


Figura 4 Pannello di controllo (Dashboard) della principale della funzionalità controllo malattie, dove è possibile individuare gli indicatori sintetici dei principali modelli sullo sviluppo fenologico della pianta e maturazione della drupa, il livello di rischio per le principali avversità e il contatore della quantità di rame distribuita durante l'anno, basato sui dati di input inseriti dall'utente nel "Registro delle operazioni colturali".

5.1.4 Modelli previsionali integrati per la mosca dell'olivo.

All'interno di olivo.net, la gestione della mosca dell'olivo (*Bactrocera oleae*) si avvale di differenti modelli e funzionalità complementari e integrate tra loro che, percorrendo le diverse fasi del ciclo vitale del fitofago, forniscono un quadro esauriente sulle tempistiche di sviluppo dell'insetto e sulla potenziale gravità delle infestazioni per ogni singola unità produttiva, aiutando così l'utente nella definizione delle più appropriate strategie di difesa, che non prescindono da un accurato monitoraggio delle infestazioni reali. Nella schermata principale del DSS si trova la sezione "mosca" in cui sono presentati gli indicatori sintetici relativi al fitofago. Cliccando su ciascuno di essi sarà possibile accedere ai grafici di dettaglio.

Più dettagliatamente, i modelli integrati in olivo.net si basano su diversi sotto-modelli che stimano, sulla base delle variabili climatiche, la dimensione della popolazione dacica nel corso della stagione attraverso calcoli riguardanti: i) l'infestazione potenziale; ii) l'infestazione attiva; iii) la gravità di infestazione, iv) l'indice di mortalità e v) la fenologia dell'insetto (Anselmi et al. 2017).

5.1.4.1 Infestazione potenziale

Il primo sotto-modello su cui si basa lo strumento di previsione dell'infestazione di mosca è quello che determina, a inizio stagione, cioè in marzo-aprile, l'infestazione potenziale. Questo modello fornisce, sulla base dell'andamento termico del periodo invernale (novembre-febbraio), una stima del livello potenziale d'infestazione della prima generazione estiva (Figura 5). Il modello è stato realizzato sulla base dei lavori pubblicati dal Prof. Ruggero Petacchi e dal suo gruppo di lavoro della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa (Petacchi et al., 2014; Petacchi et al., 2015; Marchi et al., 2015; Marchi et al., 2016; Volpi et al., 2020). Secondo quanto evidenziato in questi lavori, temperature miti consentono a un numero maggiore di individui di sopravvivere al periodo invernale e determinano pertanto una maggiore pressione della popolazione estiva. Il modello fornisce quindi indicazioni utili per la tempestività e la regolarità dei monitoraggi di campo, comunque fondamentali per la definizione dell'epoca di trattamento.

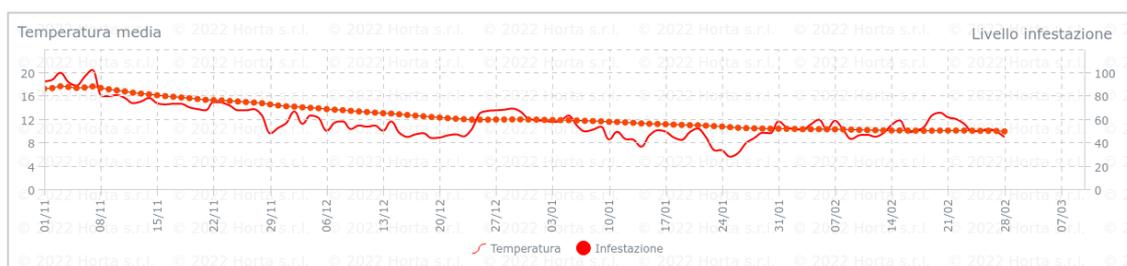


Figura 2: Grafico di dettaglio dell'infestazione potenziale di mosca dell'olivo, per uno specifico oliveto sulla base della

temperatura media e del periodo dell'anno. La linea rossa rappresenta l'andamento delle temperature medie giornaliere per il periodo 1° novembre - 28 febbraio. I cerchi rossi rappresentano la valutazione del livello di infestazione sulla base dei dati meteorologici disponibili fino alla data di consultazione. Al raggiungimento del 28 febbraio si ottiene la stima finale della pressione della popolazione svernante e conseguentemente il livello di infestazione della prima generazione.

5.1.4.2 Infestazione attiva.

La funzionalità “infestazione attiva” permette di gestire i dati di monitoraggio relativo all’incidenza di drupe con presenza di larve vitali di I e II età. L’indicatore di dettaglio in figura 6 diventa attivo dal momento in cui, nel modulo “monitoraggio”, viene inserito il primo rilievo dove è stata identificata una drupa infestata.

L'aggiornamento avviene contestualmente alla registrazione di ogni nuovo rilievo e il semaforo rosso indica il superamento delle soglie d'intervento, differenziate a seconda della destinazione produttiva dell'oliveto.

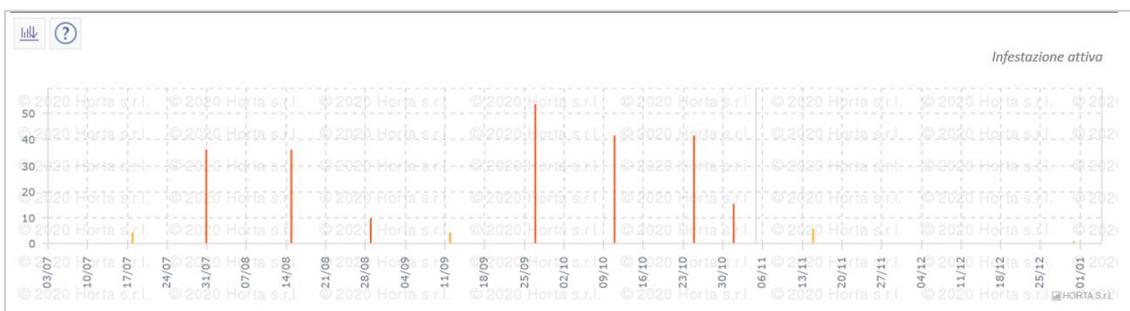


Figura 3: Grafico di dettaglio dell'Infestazione attiva: gli istogrammi rappresentano la percentuale d'infestazione pre-immaginaria rilevata nelle drupe di un'unità produttiva, nei giorni relativi ai singoli rilievi.

5.1.4.3 Gravità d' infestazione.

Il sotto-modulo “gravità d’infestazione” esprime la situazione nel tempo del livello di allerta determinato sulla base della media delle catture settimanali delle femmine effettuato mediante trappole cromotropiche e delle temperature registrate dalla stazione meteorologica associata all’oliveto.

Per questa funzione si è fatto riferimento all’algoritmo sviluppato, nel 1991, dal Prof. Claudio Pucci e collaboratori dell’Università della Tuscia di Viterbo (Pucci et al., 2005; Pucci et al., 2013).

Questo modello fornisce inoltre indicazioni sulla tempestività e regolarità delle attività di monitoraggio di campo propedeutiche alle funzioni di “infestazione attiva” e “gravità d’infestazione”. Ad esempio, se i mesi di luglio e agosto sono stati favorevoli alla seconda e terza generazione, si dovranno svolgere ripetuti e frequenti monitoraggi per valutare l’infestazione attiva e gravità di infestazione.

Operativamente, come evidenziato nel grafico di dettaglio della figura 7, per uno specifico oliveto, l'indice di gravità (Z) dell'infestazione della mosca viene rappresentato con una linea continua. Quando la linea diventa rossa e supera la linea nera tratteggiata, l'intervento di difesa è giustificato.

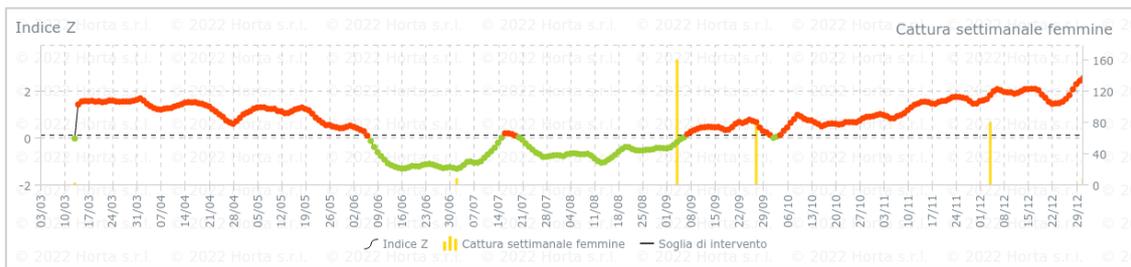


Figura 4: L'indice di gravità Z viene determinato sulla base dei dati medi settimanali di temperatura dell'aria e del monitoraggio inserito sul sistema "numero di femmine conteggiate su trappola cromotropica". La curva rappresenta l'indice che può assumere un colore verde, quando il grado d'infestazione è al di sotto la soglia d'intervento; oppure un colore rosso, quando il grado d'infestazione è al di sopra la soglia d'intervento, ed è pertanto consigliato intervenire nei giorni a seguire con una strategia larvicida. La soglia di intervento ($Z=0.1$) è rappresentata dalla linea orizzontale rossa tratteggiata. Gli istogrammi gialli rappresentano il numero medio di femmine catturate su trappola cromotropica, in corrispondenza del giorno in cui è stato effettuato il rilievo.

5.1.4.4 Indice di mortalità

In questo sotto-modulo viene tenuto conto dell'indice di mortalità delle forme giovanili dell'insetto, durante le prime due generazioni, elaborato sulla base della stima della presenza di condizioni termiche sfavorevoli durante il periodo estivo (Figura 8). Tanto più sfavorevoli sono le temperature, tanto più il rischio d'infestazione è basso a causa della elevata mortalità delle forme giovanili; infatti, oltre i 31 °C gli stadi giovanili vanno incontro a morte.

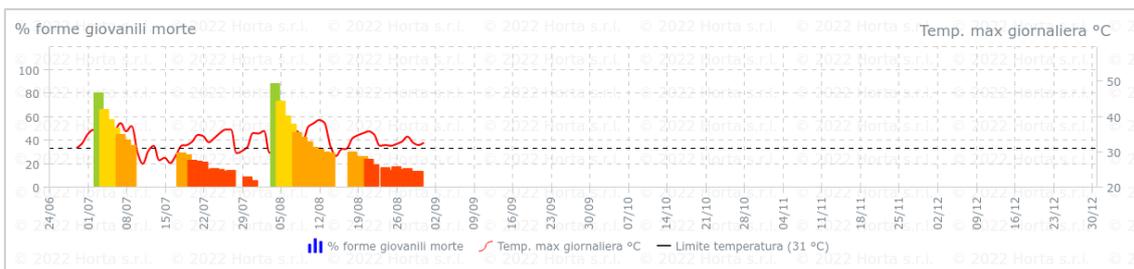


Figura 5: Stima della mortalità da stress termico delle forme giovanili (uova e larva di prima età) delle prime due generazioni di mosca dell'olivo. La linea rossa rappresenta la temperatura massima giornaliera. La linea nera orizzontale rappresenta il limite di 31 °C oltre il quale gli stadi giovanili vanno incontro a morte. Gli istogrammi descrivono la stima della percentuale di popolazione suscettibile alle alte temperature.

5.1.4.5 Fenologia della mosca dell'olivo

Il modello fenologico per la mosca dell'olivo simula, principalmente su base termica, l'andamento delle generazioni di mosca a partire dalle prime uova presenti nelle drupe, distinguendo, per ogni generazione, i diversi stadi di sviluppo dell'insetto. Il modello rappresenta un'evoluzione del modello Olifly sviluppato dall'Università di Firenze (Sacchetti & Belcari, 2004).

Cliccando sul grafico di sintesi riportato in figura 9, è possibile accedere alle informazioni di dettaglio relative a quella determinata generazione

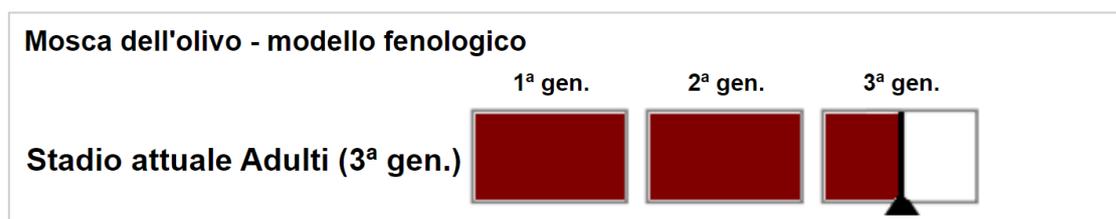


Figura 6: Cruscotto di sintesi che rappresenta lo stadio fenologico di ogni generazione della mosca dell'olivo al momento della consultazione.

5.1.5 Modello previsionale per *Venturia oleaginea*

In merito al modello previsionale per *Venturia oleaginea*, agente dell'occhio di pavone, il livello di allerta visualizzato nel cruscotto riportato in figura 4 è determinato dalla disponibilità di inoculo e delle condizioni ambientali. Ad esempio, il colore rosso dell'indicatore suggerisce che sono presenti conidi per l'inoculo e che nei giorni seguenti è previsto un evento infettivo severo. Al contrario, il colore verde indica che non vi è disponibilità di inoculo e che pertanto, indipendentemente dalle condizioni ambientali delle ore successive, non vi è rischio di infezione.

Rimane comunque fondamentale, in tutti i casi, accedere ai grafici di dettaglio, per avere informazioni suppletive e utili a valutare l'evoluzione del processo infettivo nel tempo. Nel grafico di dettaglio del modello della malattia è possibile, infatti, visualizzare l'andamento del potenziale di inoculo, degli eventi infettivi e del rischio infettivo cumulato nel corso della stagione (Figura 10).

Il grafico del potenziale di inoculo rappresenta, grazie a degli istogrammi, il tasso di sporulazione giornaliero delle colonie del patogeno (Figura 10a). Il potenziale di inoculo è influenzato dalle condizioni ambientali di temperatura e umidità e tramite le indicazioni fornite dal grafico è possibile valutare l'evoluzione dei processi infettivi nelle ore successive alla consultazione: se, ad esempio, nel grafico la disponibilità di inoculo è uguale a zero

(rappresentata da assenza di istogramma), nessuna infezione è attesa; al contrario, la presenza di istogramma, indica colonie sporulanti presenti, con livello di allerta per possibili infezioni crescente al crescere del relativo valore. Nel secondo grafico di dettaglio gli istogrammi rappresentano invece la presenza giornaliera di uno o più cicli infettivi, in funzione della temperatura, dalla bagnatura e della pioggia: affinché inizi un nuovo ciclo infettivo, devono essere previsti almeno 2.0 mm di pioggia e quando l'istogramma è pari a zero le condizioni ambientali non rendono possibile l'infezione (Figura 10b).

Infine, l'ultimo grafico mostra l'andamento cumulato del rischio giornaliero d'infezione in due periodi: il primo periodo va da aprile a fine giugno (infezione primaverile) e il secondo periodo va da settembre a fine novembre (infezione autunnale). Il colore della linea cambia da verde a giallo, e da giallo a rosso in funzione dell'incremento del valore cumulato di rischio d'infezione (Figura 10c). Nel caso rappresentato in figura 10c, il colore verde della linea sta a significare che il rischio di infezione cumulato era minimo.

Il modello relativo a *V. oleaginea* appena descritto ha evidenziato, nel corso di questi primi anni di applicazione, una necessità di approfondimento relativamente alla variabile di stato della sporulazione; tale necessità ha giustificato una delle attività di ricerca che verranno dettagliatamente descritte nel capitolo 7 di questa Tesi.

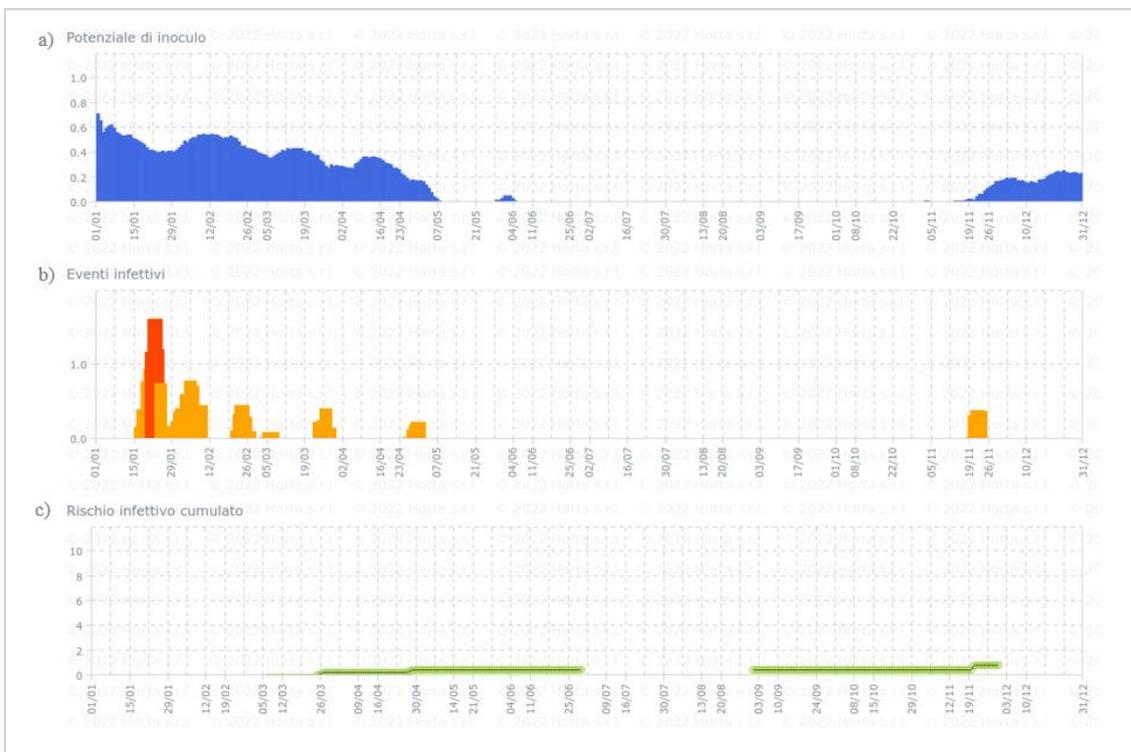


Figura 7: Grafico di dettaglio del modello Occhio di Pavone che permette di visualizzare l'andamento di: a) potenziale di inoculo, b) eventi infettivi e c) rischio infettivo cumulato nel corso della stagione.

5.2 Considerazioni sul sistema olivo.net: punti di forza e di debolezza

Non si può negare che la realizzazione del sistema olivo.net sia stato un lavoro molto impegnativo sia per la complessità della coltura che per la necessità di integrare diverse esigenze in un'unica piattaforma.

Esso, tuttavia, sia pur ancora in fase di implementazione, soprattutto nel campo fitosanitario, ha portato a risultati significativi, fornendo informazioni puntuali e dettagliate su molteplici aspetti che caratterizzano la gestione dell'oliveto e, quindi, consentendo al tecnico o all'olivicoltore di prendere decisioni più consapevoli e tempestive.

In particolare, questo strumento permette di: i) garantire (almeno per *Bactrocera oleae* e *Venturia oleaginea*) un uso sostenibile dei prodotti fitosanitari attraverso l'utilizzo di modelli previsionali e l'ottimizzazione delle applicazioni in base al meteo, e la specificità degli interventi di difesa in rapporto alla situazione dei singoli oliveti; ii) preservare e razionalizzare le risorse primarie (suolo, acqua, biodiversità); iii) migliorare le performance economiche delle coltivazioni; iv) ridurre l'impatto ambientale delle coltivazioni senza pregiudicarne le rese e la qualità tecnologica; v) migliorare la tracciabilità e rintracciabilità delle attività e dell'operazioni registrate dal sistema durante la stagione, permettendo una maggior trasparenza e conseguentemente fornendo un maggior valore aggiunto lungo la filiera; vi) garantire formazione, attraverso incontri e seminari; vii) fornire un accesso continuativo a informazioni aggiornate sui mezzi tecnici, le loro caratteristiche e limitazioni d'impiego, sulle condizioni ambientali, sulla situazione dei oliveti, sull'eventuale presenza ed evoluzione di malattie ed insetti nocivi; viii) fronteggiare la variabilità climatica, impiegando degli strumenti in grado di analizzarla e di mitigarne gli effetti e di sostenere la produzione; ix) monitorare da remoto contestualmente differenti oliveti e, infine, x) conoscere in tempo reale lo stato del territorio e poter ottenere delle proiezioni previsionali su ampi areali.

Oltre ai modelli previsionali, olivo.net ha infatti una sezione che permette la tracciabilità delle operazioni colturali e una relativa alla sostenibilità con il calcolo dei principali indicatori che caratterizzano la produzione agricola. Non ultima la sezione relativa al monitoraggio delle colture che consente una continua validazione e ri-calibrazione dei modelli previsionali presenti e anche la possibilità di acquisire un database storico di osservazioni unico nel suo genere.

La possibilità di poter condividere tutte queste informazioni in tempo reale da parte degli operatori rende olivo.net uno strumento di lavoro fondamentale per il settore (Anselmi et al. 2017).

Nel mettere a punto olivo.net, Horta ha pertanto creato un importante strumento *web* interattivo per supportare la coltivazione dell'olivo secondo i principi dell'agricoltura sostenibile e di precisione; esso permette infatti di attenuare numerose criticità che caratterizzano la coltura dell'olivo, coltura difficilmente standardizzabile, caratterizzata da innumerevoli cultivar, da sesti di impianto non sempre regolari e da sistemi di conduzione e raccolta diversi da provincia a provincia.

Il coinvolgimento nella progettazione della piattaforma del Consorzio Olivicolo Italiano UNAPROL, autorevole rappresentante dell'utenza del servizio, ha indubbiamente permesso di meglio leggere le esigenze degli operatori del settore e di ottimizzare i risultati.

D'altra parte, al contrario di quanto spesso succedeva in passato per sistemi di questo tipo (McCown, 2002; Stone & Hochman, 2004), poiché olivo.net fornisce elementi informativi e opzioni, lasciando però agli utenti l'effettivo momento decisionale, si sono avuti buoni risultati in termini di accettazione da parte degli olivicoltori e degli operatori del settore.

Il fatto che gli agricoltori di oggi siano assai più propensi di quelli del passato all'uso di nuove tecnologie (Thyssen, 2000; McCown et al., 2002), fa inoltre presumere che il sistema olivo.net presenti in futuro una tendenza positiva in termini di diffusione e adozione tra gli olivicoltori, questo soprattutto quando la piattaforma riuscirà a contemplare modelli in grado di prevedere gli attacchi e definire una strategia di difesa integrata o biologica (Jones et al., 2010; Gent et al., 2011; Rossi et al., 2012) per tutti i parassiti, risultando così di grande ausilio nell'ottemperare le nuove normative fitosanitarie previste a livello comunitario e nazionale (De Castro & Blasi, 2022).

Per quanto di grande importanza, il supporto olivo.net presenta ampio margine di miglioramento, sia per carenze strutturali, sia per vari aspetti ancora non affrontati.

Tra gli aspetti operativi, una grossa difficoltà, in parte superata, deriva dalla carente rete agrometeorologica che supporta la piattaforma: inizialmente formata da poche decine di stazioni e oggi costituita da circa 150 stazioni meteo, che in ogni caso necessita di essere ulteriormente potenziata (Anselmi et al. 2017).

Un'ulteriore criticità emersa nel sistema all'inizio del mio Dottorato è stata la limitatezza dei parassiti presi in considerazione, allora limitati alle sole *Bactrocera oleae* (mosca) e *Venturia oleaginea* (agente dell'occhio di pavone). In olivicoltura, infatti, problemi altrettanto gravi possono essere causati da *Colletotrichum* spp., agente dell'Antracnosi e dal batterio di nuova introduzione, *Xylella fastidiosa* Wells, un batterio poli ospite che è giunto accidentalmente in Salento e veicolato dall'insetto *Philaenus spumarius* L. (EPPO, 2018; Vos et al., 2019; Cola & Sarnari, 2020).

Per questo motivo si è ritenuto opportuno incentrare la mia Tesi, tra l'altro, sullo sviluppo di modelli matematici relativi ai sopra citati patogeni e vettori non ancora analizzati e sul miglioramento della funzione di sporulazione del patogeno *V. oleaginea* attualmente presente nel sistema.

Le ricerche del mio Dottorato sono andate in questa direzione, cercando di colmare tali lacune e con la volontà che tali integrazioni, una volta apportate al sistema olivo. net, possano concorrere a renderlo ancor più efficiente quale sistema esperto per produrre consigli e allarmi efficaci, rendendo la coltivazione italiana dell'olivo più competitiva e più importante che mai.

5.3 Bibliografia

Anselmi, A., Caruso, G., Cola, G., Gucci, R., Meriggi, P., Rossi, V., Sandali, P., Scaramozzino, N., & Servili, M. (2017). Un sistema di supporto alla gestione dell'oliveto. *Olivo e Olio*, 5, 28–32.

Cola, M., & Sarnari, S. (2020). *La competitività della filiera olivicola analisi della redditività e fattori determinanti*. Rete Rurale Nazionale - Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali. <https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/22376>

De Castro, P., & Blasi, G. (2022). “Farm to Fork Strategy” e ricadute sul sistema fitosanitario nazionale. *Giornate Fitopatologiche*.

EPPO. (2018). PM 7/24 (3) *Xylella fastidiosa*. *EPPO Bulletin*, 48(2), 175–218. <https://doi.org/10.1111/epp.12469>

Gent, D. H., De Wolf, E., & Pethybridge, S. J. (2011). Perceptions of risk, risk aversion, and barriers to adoption of decision support systems and integrated pest management: An introduction. *Phytopathology*, 101(6), 640–643. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-10-0124>

Jones, V. P., Brunner, J. F., Grove, G. G., Petit, B., Tangren, G. V., & Jones, W. E. (2010). A web-based decision support system to enhance IPM programs in Washington tree fruit. *Pest Management Science*, 66(6), 587–595. <https://doi.org/10.1002/ps.1913>

Marchi, S., Guidotti, D., Ricciolini, M., & Petacchi, R. (2015). Mosca delle olive: un modello previsionale per salvaguardare la qualità. *L'informatore Agrario*, 6(January), 66–71.

Marchi, S., Guidotti, D., Ricciolini, M., & Petacchi, R. (2016). Towards understanding temporal and spatial dynamics of *Bactrocera oleae* (Rossi) infestations using decade-long

- agrometeorological time series. *International Journal of Biometeorology*, 60(11), 1681–1694. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1159-2>
- McCown, R. L. (2002). Changing systems for supporting farmers' decisions: Problems, paradigms, and prospects. In *Agricultural Systems* (Vol. 74, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00026-4)
- McCown, R. L., Hochman, Z., & Carberry, P. S. (2002). Probing the enigma of the decision support system for farmers: Learning from experience and from theory. *Agricultural Systems*, 74(1), 1–10.
- Petacchi, R., Guidotti, D., Marchi, S., & Ricciolini, M. (2014). Organizzazione e analisi della banca dati decennale su *Bactrocera oleae* in Toscana. *Atti Giornate Fitopatologiche Vol. 1*, 475–484.
- Petacchi, R., Marchi, S., Federici, S., & Ragolini, G. (2015). Large-scale simulation of temperature-dependent phenology in wintering populations of *Bactrocera oleae* (Rossi). *Journal of Applied Entomology*, 139(7), 496–509. <https://doi.org/10.1111/jen.12189>
- Pucci, C., Iannotta, N., Duro, N., Jaupi, A., Thomaj, F., Speranza, S., & Paparatti, B. (2013). Application of a statistical forecast model on the olive fruit fly (*Bactrocera oleae*) infestation and oil analysis in Albania. *Bulletin of Insectology*, 66(1721–8861), 309–314.
- Pucci, C., Spanedda, A. F., Paparatti, B., & Speranza, S. (2005). *Modelli di previsione della gravità dell'infestazione da Bactrocera oleae*. HLAD -Papirna konfekcija, Pluska - Luka - kolovoz.
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rossi, V., Salinari, F., Poni, S., Caffi, T., & Bettati, T. (2014). Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems: The example of vite.net@. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.011>

- Sacchetti, P., & Belcari, A. (2004). Olifly simulator: un nuovo software per il miglioramento delle strategie di controllo integrato della mosca delle olive. *Giornate Di Studio Metodi Numerici, Statistici e Informatici Nella Difesa Delle Colture Agrarie e Delle Foreste: Ricerca e Applicazioni*.
- Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., & Meier, U. (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Annals of Applied Biology*, 140(2), 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00167.x>
- Sardone, R., Pupo D'Andrea, M. R., & Marras, M. R. (2021). *Annuario dell'agricoltura italiana 2020: Vol. LXXIV*.
- Stone, P., & Hochman, Z. (2004). If interactive decision support systems are the answer, have we been asking the right questions? In *New directions for a diverse planet. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*.
- Thyssen, I. (2000). Agriculture in the information society. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 76(3), 297–303. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0580>
- Volpi, I., Guidotti, D., Mammini, M., Petacchi, R., & Marchi, S. (2020). Managing complex datasets to predict *Bactrocera oleae* infestation at the regional scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105867>
- Vos, S., Camilleri, M., Diakaki, M., Lázaro, E., Parnell, S., Schenk, M., Schrader, G., & Vicent, A. (2019). Pest survey card on *Xylella fastidiosa*. *EFSA Supporting Publications*, 16(6). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.en-1667>

CAPITOLO 6 - SVILUPPO DI UN MODELLO MECCANICISTICO PREVISIONALE GUIDATO DALLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE PER L'ANTRACNOSI DELL'OLIVO

Come accennato nel terzo capitolo, l'antracnosi dell'olivo, causata da un complesso di specie diverse afferenti al genere *Colletotrichum* (Martín & García-Figueres, 1999; Agosteo et al., 2002; Cacciola et al., 2012; Mosca et al., 2014; è considerata la più importante malattia dei frutti (drupe) dell'olivo a livello mondiale, Italia compresa, con enormi perdite di produzioni. Sebbene la malattia possa interessare organi diversi, sono gli attacchi sui frutti (Figura 1) a determinare i danni più gravi, con perdita di produzione e con ripercussioni sulla qualità dell'olio (Cacciola et al., 2012; Moral et al., 2021).



Figura 1: Sintomi di antracnosi su drupe di olivo, riscontrati durante le attività di monitoraggio.

Sebbene si siano avute segnalazioni di presenza e danni anche nelle regioni centrali e in Liguria (Ricciolini & Rizzo, 2010), in Italia il patogeno causa danni particolarmente gravi nelle regioni meridionali, in particolare in Calabria e Puglia, dove rappresenta uno dei parassiti più gravi della coltura (Cacciola et al., 2012; Agosteo et al., 2002). Nel nostro Paese le specie patogene prevalenti nelle aree olivicole della Puglia e della Calabria risulterebbero *C. acutatum* senso lato e *C. godetiae* (syn. *C. clavatum*); recentemente è stata segnalata anche *C. nymphaeae* in Puglia, mentre in Sicilia risultano presenti *C. gloeosporioides* e *C. cigarro* (Cacciola et al., 2012; Mosca et al., 2014; Schena et al., 2017; Nigro et al., 2017; Antelmi et al., 2017).

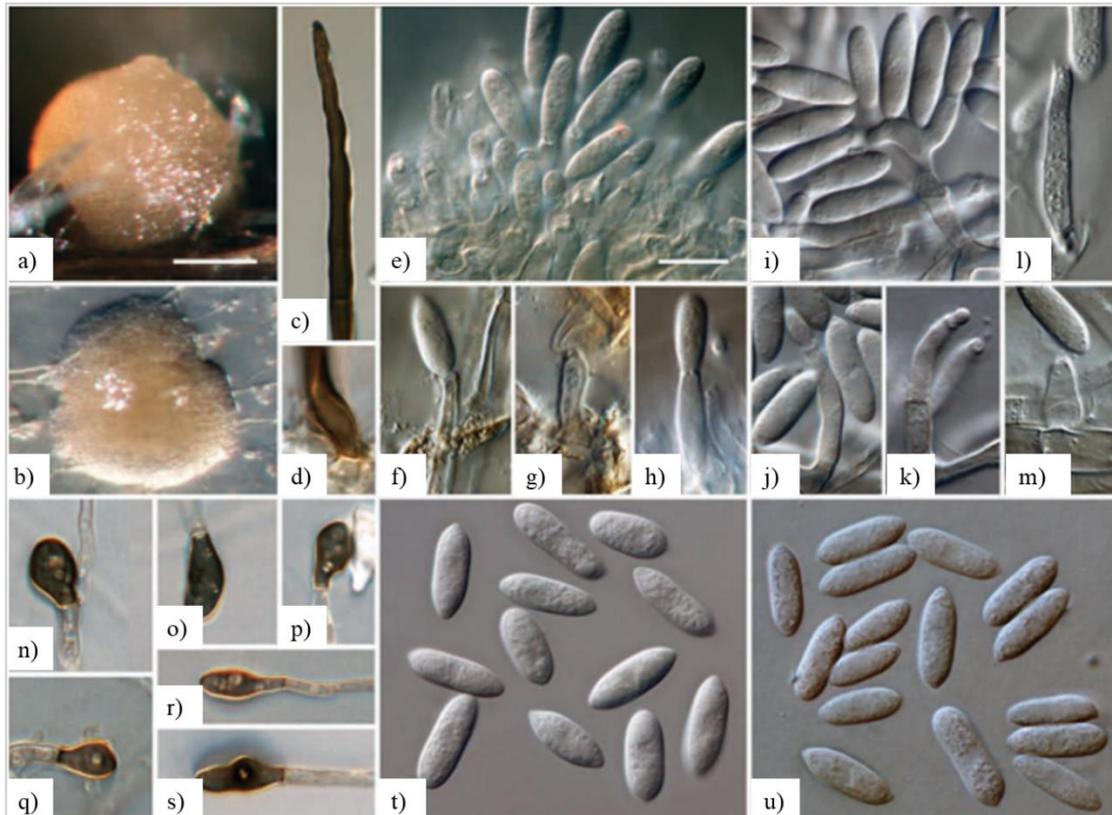


Figura 2: *Colletotrichum godetiae* (F-G, L-M, T-U da ceppo ex-olotipo CBS 133.44. A-E, H-K, N-S dal ceppo CBS 125972). A-B. Conidiomata. C. Parte apicale di un'ifa. D. Parte basale di un'ifa. E-M. Conidiofori. N-S. Appressori. T-U. Conidi. A, C-H, T. da gambo di *Anthriscus*. B, I-S, U. da SNA. A-B. DM, C-U. DIC, barre di scala: A = 100 μ m, E = 10 μ m. La barra di scala di A si applica ad A-B. La barra di scala di E si applica a C-U (Da: (Damm et al., 2012).

Le strategie per prevenire le infezioni di questa malattia sull'olivo dovrebbero basarsi su una integrazione di difesa genetica (cultivar resistenti), agronomica (bassa densità di impianto, adeguate potature per favorire l'arieggiamento della chioma), chimica e biologica.

Oggi più che mai, soprattutto per gli oliveti in regime biologico, la tempistica delle applicazioni risulta fondamentale, tenendo in considerazione che il controllo della malattia è maggiore quando le irrorazioni vanno a prevenire le infezioni primarie: un ritardo nella prima applicazione può portare a una scarsa difesa e a perdite di resa anche consistenti. Altrettanto inefficaci possono risultare trattamenti intempestivi contro le infezioni secondarie; per questo motivo al fine di razionalizzare tale lotta, sarebbe importante mettere a punto strumenti che permettano di prevedere gli eventi infettivi.

A questo fine abbiamo rivolto parte delle ricerche della mia Tesi di Dottorato alla realizzazione di un modello meccanicistico previsionale delle infezioni di tale malattia sulla base delle condizioni metereologiche.

Sebbene il quadro tassonomico in rapida evoluzione di *Colletotrichum* spp. su olivo e i cambiamenti recentemente osservati nelle popolazioni ostacolino in parte il confronto degli

studi epidemiologici condotti in tempi e Paesi diversi, il ciclo biologico e le manifestazioni del patogeno sembrerebbero seguire andamenti simili (Martín & García-Figueres, 1999; Talhinhos et al., 2018; Moral et al., 2021).

Per raggiungere questo obiettivo, le informazioni rilevanti sono state reperite attraverso una ricerca in letteratura per impiegarle nello sviluppo di un modello concettuale del ciclo di biologico di *C. acutatum*, basato sull'analisi dei sistemi. Dopo aver utilizzato i dati pubblicati per sviluppare equazioni matematiche che descrivono il sistema sia quantitativamente che dinamicamente, è stata valutata la capacità del modello di rappresentare il patosistema reale.

5.1 Caratteri epidemiologici del patogeno

Poiché lo stadio sessuale di *Colletotrichum* spp. non è stato finora osservato sull'olivo, sono essenzialmente i conidi a diffondere la malattia (Figura 2). Essi sono prodotti da acervuli in una matrice mucillaginosa idrosolubile e vengono dispersi dalla pioggia e dalle gocce d'acqua portate dal vento (Cacciola et al. 2012; Moral & Trapero, 2012; Moral et al., 2012).

Il patogeno sverna nei frutti mummificati, nei tessuti dei rametti infetti (nonché nelle foglie), organi che funzionano da principale fonte di inoculo primario (Figura 3) (Moral et al., 2009).

Inoltre, possono essere infettati germogli, foglie, infiorescenze e drupe (Talhinhos et al., 2005; Faedda et al., 2011; Cacciola et al., 2012; Mosca et al., 2014; Savary & Willocquet, 2014; Romero et al., 2021; Moral et al., 2008), ma gli attacchi sulle foglie e sui germogli sono in genere meno frequenti e spesso sono asintomatici (Moral et al., 2008).

In primavera, alla ripresa vegetativa, se le condizioni ambientali sono favorevoli, i conidi del fungo germinano attaccando soprattutto i fiori e i frutticini in allegagione. In seguito a tali infezioni possono verificarsi necrosi delle gemme a fiore e degli ovari (Moral et al., 2008), con alterazioni e cascola fiorale.

Nella maggioranza dei casi però queste infezioni rimangono in una fase latente, per poi presentarsi con i tipici sintomi sui frutti immaturi quando sono di dimensioni pari a quelle di un grano di pepe (2-4 mm) e di un pisello (5-10 mm) (Sergeeva et al., 2008b; Moral & Trapero, 2009).

In entrambe queste fasi si può manifestare cascola dei frutti o, in alternativa, i frutti possono rimanere sulla pianta mostrando successivamente colonie sporulanti del patogeno, per poi disseccarsi e mummificare, diventando fonti di inoculo per la stagione successiva.

La malattia è policiclica, con cicli di infezioni secondarie che, a partire da frutti infetti mummificati e/o marcescenti, possono svilupparsi durante la seconda parte della stagione,

causando improvvisi aumenti dell'incidenza delle infezioni (Trapero & Blanco, 2004; Moral & Trapero, 2009; Moral & Trapero, 2012).

Il patogeno, infatti, si conserva e si moltiplica sia sui tessuti morti sia su quelli infetti e pertanto tutti gli organi colpiti possono rappresentare fonte di inoculo per le infezioni, soprattutto autunnali: questa capacità di sopravvivere e moltiplicarsi in assenza di sintomi può spiegare perché l'antracnosi causa spesso perdite di raccolto inaspettate (Moral et al., 2021).

È soprattutto in autunno che si sovrappongono diversi cicli di infezione, favoriti dal tipico clima autunnale piovoso e fresco, che se non interrotti portano ad una perdita consistente della produzione; ciò anche per il fatto che la suscettibilità dei frutti all'infezione aumenta dopo l'invasatura (Moral et al., 2008).

Il numero di cicli secondari, la gravità e l'incidenza della malattia dipendono fortemente da fattori genetici (cultivar) e agronomici (densità delle piante nell'oliveto, densità della chioma), dalle condizioni ambientali (ad esempio, eventi piovosi seguiti da temperature miti e lunghi periodi di bagnatura) e dalla virulenza della popolazione del patogeno (Cacciola et al., 2012; Romero et al., 2021),.

Durante le fasi di infezione sulle drupe, in particolare su quelle mature, si osservano serie di macchie necrotiche, da cui emergono, attraverso la cuticola, innumerevoli acervuli che vanno a rappresentare la fonte dell'infezione secondaria (Talhinhas et al., 2011).

Infatti, in condizioni di elevata umidità, i frutti infetti appaiono molli, con un marciume marrone scuro che induce la produzione di un'abbondante matrice gelatinosa arancione sulla superficie del frutto, da cui si sviluppano gli acervuli. Durante i periodi di siccità, per disidratazione i frutti infetti mummificano, cadendo a terra prematuramente oppure rimanendo sulla pianta fino alla ripresa della stagione vegetativa (Cacciola et al., 2012).

Le infezioni si possono sviluppare anche su drupe già raccolte, durante la conservazione in magazzino, prima dell'avvio dell'estrazione dell'olio.

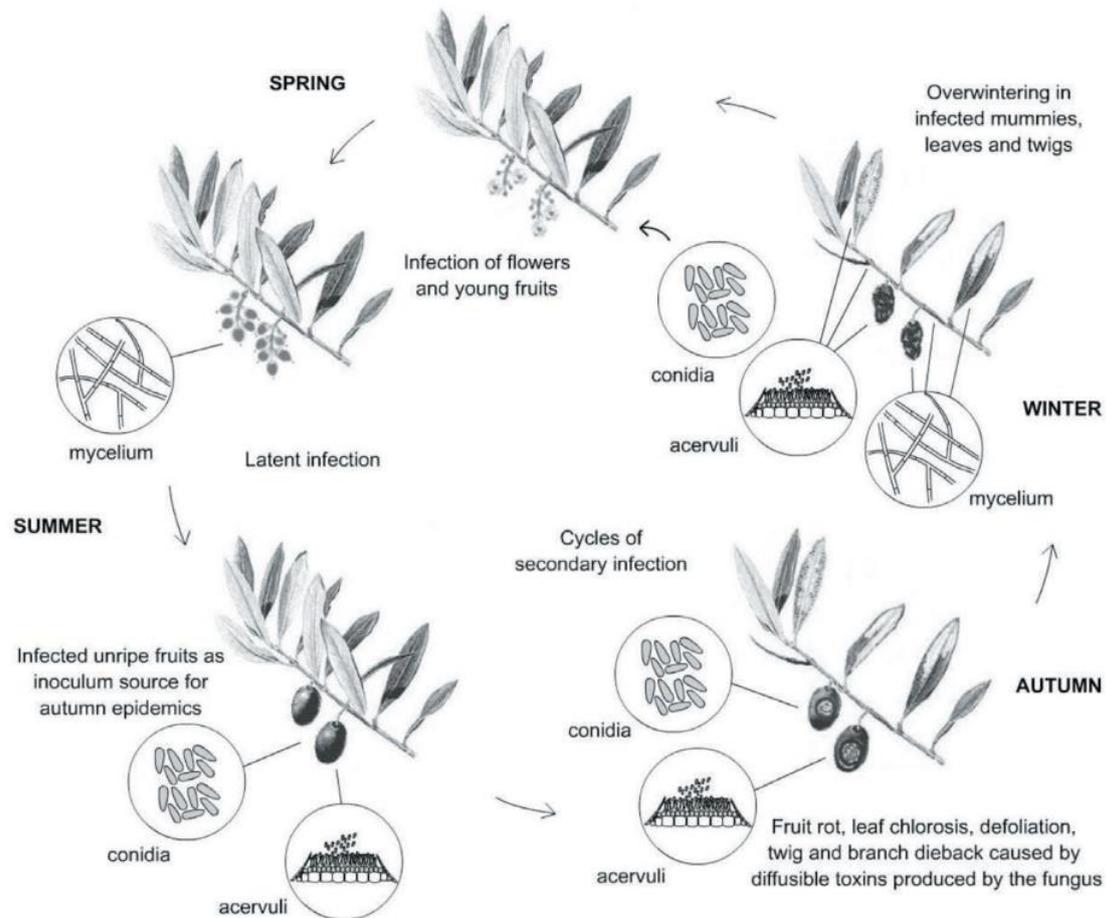


Figura 3: Ciclo biologico di *Colletotricum* spp. su olivo (Da: Cacciola et al., 2012).

Colletotricum spp. sviluppa a temperature comprese tra 10 e 30°C con una crescita ottimale a 25°C (Chattaoui et al., 2016).

In condizioni di laboratorio, temperature tra i 10 °C e i 30 °C, in combinazione con umidità relativa superiore al 93%, rappresentano le condizioni per la formazione degli acervuli. La formazione di questi può richiedere da 6 a 9 giorni di incubazione con temperature comprese tra 15 °C e 25 °C (Graniti et al., 1993).

La temperatura ottimale per la produzione di conidi sulle drupe infette è di circa 20°C, con sporulazione particolarmente abbondante sulle drupe di varietà suscettibili (Moral & Trapero, 2012; Moral et al., 2010).

In letteratura, il tempo di incubazione, definito come il tempo che intercorre tra l'infezione e la comparsa dei sintomi, non è ben definito. Al contrario, la latenza, definita come il tempo che intercorre tra l'infezione e la comparsa degli acervuli, è ben nota (Loprieno & Tenerini, 1960; Moral et al., 2009b; Moral & Trapero, 2012; Schena et al., 2017).

Il processo infettivo inizia con la germinazione dei conidi e la formazione di appressori che permettono al fungo di penetrare nella cuticola del frutto. Per la germinazione dei conidi sulla

superficie dell'ospite è necessario un velo di acqua libera (Cacciola et al., 2012; Agosteo et al., 2015).

6.2 Obiettivi della ricerca

Anche se gli elementi chiave dell'epidemiologia dei *Colletotrichum* spp. dell'olivo sono noti, non sono disponibili strumenti per prevedere lo sviluppo della malattia nell'oliveto (Romero et al., 2021), pertanto è necessario migliorare le strategie fitosanitarie sulla base delle informazioni acquisite con l'applicazione di metodologie avanzate (Kolainis et al., 2020), che aiuterebbero notevolmente gli agricoltori a programmare le irrorazioni di fungicidi e quindi a controllare la malattia. A questo fine è stato dimostrato che i modelli meccanicistici sono più accurati e robusti di quelli empirici (Caffi et al., 2007) e possono essere sviluppati sia concettualmente che matematicamente utilizzando l'analisi dei sistemi (Leffelaar & Ferrari, 1989) e i dati pubblicati (Rossi et al., 2010; Rossi et al., 2015).

L'obiettivo principale di questa ricerca è stato quello di sviluppare un modello meccanicistico che possa prevedere gli attacchi della malattia sulla base delle condizioni atmosferiche.

Per raggiungere questo obiettivo, abbiamo recuperato le informazioni rilevanti attraverso una ricerca bibliografica e abbiamo eseguito prove in campo per raccogliere informazioni sull'incidenza della malattia; infine, abbiamo utilizzato queste informazioni per sviluppare e validare un modello concettuale del ciclo di vita del patogeno in parola.

6.3 Materiali e metodi

6.3.1 Ricerca in letteratura

Un'accurata analisi della letteratura è stata sviluppata seguendo le varie pubblicazioni che potevano essere di aiuto nel reperimento di informazioni quanto più complete ed approfondite sulla biologia, sull'ecologia e sull'epidemiologia delle specie afferenti al complesso *C. acutatum* in senso lato che causa l'antracnosi dell'olivo.

La ricerca della letteratura è stata effettuata nelle banche dati bibliografiche digitali *Scopus* (<https://www.scopus.com>), *Web of Science* (<https://apps.webofknowledge.com>) e *Google Scholar* (<https://scholar.google.it>), e si è conclusa il 1° luglio 2021.

Per essere presi in considerazione, gli articoli dovevano soddisfare i seguenti criteri: i) essere scritti in inglese; ii) contenere dati originali sulla biologia, l'ecologia o l'epidemiologia del patogeno dell'antracnosi; iii) contenere dati originali sull'interazione tra il patogeno

dell'antracnosi e l'olivo; iv) essere pubblicati su riviste, atti o in altre forme, compresi rapporti o siti web di autorità/organizzazioni competenti.

Sulla base di questi criteri, sono state formulate query specifiche per la ricerca di articoli accademici, recensioni, articoli in stampa e documenti di conferenze nei tre database bibliografici digitali. La ricerca è stata limitata a titoli, abstract e parole chiave, combinando le seguenti parole chiave: i) complesso di specie di *Colletotricum* dell'olivo o sinonimi; ii) antracnosi dell'olivo o epidemiologia o patologia o antracnosi; iii) ciclo vitale o dispersione o germinazione o infezione o incubazione o latenza o periodo latente o acervuli o conidi o fonte di svernamento o modello o previsione o simulazione.

Gli articoli sono stati esaminati e selezionati sulla base delle informazioni contenute nel titolo e nell'abstract; il testo completo di ogni articolo selezionato è stato poi letto e rivisto. Ulteriori articoli sono stati reperiti a partire dai riferimenti bibliografici degli articoli selezionati e successivamente rivisti.

6.3.2 Analisi del sistema e sviluppo del modello

Utilizzando l'analisi di sistema (Leffelaar & Ferrari, 1989; Rossi et al., 2010), le informazioni provenienti dalla ricerca bibliografica sono state utilizzate per concettualizzare il modello e disegnare un diagramma relazionale che andasse a rappresentare la struttura e la dinamica del sistema patogeno-ambiente. Le componenti principali del diagramma relazionale sono: i) le variabili di stato, ii) i flussi, iii) le variabili di tasso, iv) le variabili ausiliarie, v) le variabili guida (esterne), vi) le costanti e vii) i parametri. Più nel dettaglio, il ciclo di vita della specie di riferimento, *C. acutatum*, è stato suddiviso in variabili di stato, ossia variabili che rappresentano lo stato del sistema; i flussi tra due stati consecutivi sono stati regolati da variabili di tasso che dipendevano a loro volta da variabili esterne e trainanti (ad esempio, le condizioni ambientali e lo stadio di crescita dell'olivo) o da interruttori che rappresentavano operatori logici con la sintassi *if 'condition' then 'go to', else 'go to'*.

La dinamica del sistema nel suo complesso è stata regolata da equazioni matematiche, che hanno permesso di mettere in relazione le variabili esterne e trainanti con i rispettivi tassi e che sono state sviluppate a partire dalla letteratura.

Più dettagliatamente, i dati reperiti attraverso la ricerca bibliografica sono serviti per lo sviluppo di un'equazione matematica all'interno della quale i fattori esterni, come dati metereologici o fenologia della pianta, rappresentano le variabili indipendenti, mentre quelle dipendenti sono rappresentate dalle variabili del sistema stesso; il modello risultante può essere utilizzato per descrivere il sistema sia qualitativamente che dinamicamente. I dati sul patogeno e sulla

malattia sono stati ottenuti direttamente dal testo, dalle tabelle e dalle figure degli articoli selezionati; per ottenere dati precisi dai grafici è stato utilizzato *Graph Grabber* v2.0.4 (<https://www.quintessa.org/software/downloads-and-demos/graph-grabber-2.0.2>), consultato il 10 agosto 2020). I dati sono stati poi adattati con equazioni matematiche appropriate, selezionate in base alla forma dei dati e al criterio di informazione di Akaike (*AIC*): sono stati poi selezionati i modelli che hanno fornito i valori *AIC* più bassi per ciascun esperimento (Wolfinger, 1996), (Analytis, 1980). I parametri delle equazioni sono stati stimati utilizzando la procedura di regressione non lineare di *SPSS* (versione 26; *IBM SPSS Statistics, IBM Corp., USA*), che minimizza le somme dei quadrati residui utilizzando l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (Vandaele, 1983). La bontà dell'adattamento è stata valutata considerando: i) l'entità degli errori standard dei parametri del modello; ii) la distribuzione dei residui dei valori previsti rispetto a quelli osservati; iii) R^2 aggiustato per il grado di libertà e iv) il numero di interazioni impiegate dall'algoritmo di Levenberg-Marquardt per convergere sulle stime dei parametri (Lourakis, 2005).

Poiché l'incubazione del patogeno è stata descritta in modo poco chiaro e non univoco in letteratura, per definire la durata e il tempo di inizio del periodo di incubazione è stata utilizzata la *Window-Pane Analysis* (Coakley et al., 1988; Kriss et al., 2010), ponendo in relazione le infezioni previste dal modello con i dati osservati. È stato ipotizzato un tempo di incubazione inferiore al periodo di latenza proposto in bibliografia, sulla base del fatto che in campo, nelle zone sotto nostro controllo, i sintomi sulle drupe sono sempre stati registrati prima della maturazione. Questa relazione è stata quantificata con una stima dei coefficienti di correlazione di rango di Spearman (ρ) (Spearman, 1904) per ciascuna data di inizio d'infezione e durata della finestra.

6.3.3 Convalida del modello

Il modello è stato valutato in base al suo scopo definito (Madden et al., 2007), ossia la sua capacità di rappresentare il sistema e di prevedere lo sviluppo di epidemie di antracnosi dell'olivo. I risultati del modello sono stati convalidati rispetto a dati reali ottenuti dal 2017 al 2019 da nove epidemie di antracnosi dell'olivo in parcelle non trattate di cinque oliveti (Figura 4). Questi dati non sono stati utilizzati in precedenza per lo sviluppo del modello.



Figura 4: Impianto olivicolo di Nardò in cui sono state condotte attività di monitoraggio nel 2017

6.3.4 Caratteristiche degli oliveti e delle stazioni meteorologiche

Gli oliveti oggetto di monitoraggio erano situati in Puglia, a Squinzano, Nardò e Leverano in provincia di Lecce, a Maruggio in provincia di Taranto (Tabella 1); essi presentavano storicità di anni di ripetuti attacchi di antracosi.

Gli oliveti considerati, tutti pianeggianti, con prevalenza di cultivar Cellina di Nardò, sono stati gestiti come di consueto per l'area, senza però effettuare alcun trattamento contro la malattia. Per stimare lo stadio fenologico prevalente delle piante (cioè, lo stadio in cui si trovavano più del 50% degli olivi) è stata utilizzata, come riferimento, la scala BBCH (Sanz-Cortés et al., 2002). Le stazioni meteorologiche "Davis Vantage Pro 2, Davis Instruments, Hayward, CA, USA", situate a meno di 1 km dagli oliveti, sono state utilizzate per raccogliere i seguenti dati di *input*: i) temperatura oraria (T , °C); ii) precipitazioni (R , mm); iii) umidità relativa (RH , %) e iv) bagnatura fogliare (WD , min).

Le attività di monitoraggio sono state condotte dai tecnici dell'OP Pugliaolive, afferenti al Consorzio Olivicolo Italiano UNAPROL.

I rilievi di malattia sono stati condotti a partire dal mese di luglio, con frequenza di uno o due rilievi al mese, determinando ogni volta l'incidenza delle drupe colpite da lebbra ($INDi$), attraverso l'osservazione randomica di 100 olive per ogni rilievo, espressa in percentuale.

Località dei siti di sperimentazione	Provincia	Coordinate	Cultivar prevalente	Serie dei monitoraggi	Anno dei monitoraggi	Acronimo dei monitoraggi condotti	Numero dei rilievi svolti
1 Avetrana	Taranto	40.32472 N 17.54083 E	Cellina di Nardò	1 2	2018 2019	Av18 Av19	4 3
2 Leverano	Lecce	40.322760 N 18.005570 E	Cellina di Nardò	3	2017	Lev 17	6
3 Nardò loc. San Simone	Lecce	40.08556 N 18.06500 E	Cellina di Nardò	4	2017	NSn17	6
4 Nardò	Lecce			5	2017	Nr18	10

			40.45611 N	Cellina di	6	2018	<i>Nr18</i>	9
			18.05806 E	Nardò	7	2019	<i>Nr19</i>	7
5	Veglie	Lecce	40.362035 N	Cellina di	8	2017	<i>Veg17</i>	5
			17.982060 E	Nardò	9	2018	<i>Veg18</i>	2

Tabella 2: Principali informazioni relativi a 5 siti sottoposti ai monitoraggi

6.3.5 Analisi dei dati

Per convalidare la capacità di previsione dello sviluppo dell'epidemia nel corso della stagione, sono state progressivamente sommate le entità delle infezioni predette dal modello durante il periodo di suscettibilità dell'ospite, per poi confrontarle con le incidenze osservate durante i monitoraggi in campo.

Per rendere i valori confrontabili, le sommatorie delle entità delle infezioni previste sono state relativizzate dividendole con il valore massimo misurato a fine stagione per ciascun sito sperimentale.

Per quantificare le prestazioni del modello, sono stati calcolati l'errore quadratico medio (*RMSE*), il coefficiente di massa residua (*CRM*) e il coefficiente di correlazione di concordanza (*CCC*) (Nash & Sutcliffe, 1970; Lin, 1989).

L'errore quadratico medio (*RMSE*), che rappresenta la distanza media dei dati reali dalla retta applicata (Nash & Sutcliffe, 1970), è stato ottenuto utilizzando la funzione *RMSE* del pacchetto R "*modeler*" (Wickham, 2019).

Il coefficiente di massa residua (*CRM*) permette di misurare la tendenza dell'equazione a sovrastimare o sottostimare i valori osservati: un *CRM* negativo indica una tendenza del modello alla sovrastima (Nash & Sutcliffe, 1970).

Il coefficiente di correlazione di concordanza (*CCC*) consiste nel prodotto di due termini: il coefficiente di correlazione Pearson prodotto-momento tra i valori osservati e quelli previsti e il coefficiente *C_b*, che indica la differenza tra la linea di miglior adattamento e la linea di concordanza perfetta (se $CCC = 1$, la concordanza è perfetta) (Lin, 1989). Il *CCC* è stato ottenuto utilizzando la funzione *epi.ccc* del pacchetto R "*epiR*" su R v. 3.6.1 (Stevenson et al., 2013).

Le diverse fonti dell' errore predittivo del modello sono state poi scomposte calcolando i coefficienti di disuguaglianza parziale di Theil (statistica U "unbias" di Theil) (Fall et al., 2015), (Smith & Rose, 1995), tra questi coefficienti: i) *U_{bias}* che è la proporzione associata alle differenze medie tra il dato osservato e il dato previsto; ii) *U_{slope}*, che è la proporzione associata alle deviazioni dalla retta 1:1; e iii) *U_{error}* che è la proporzione associata alla varianza non spiegata (Smith & Rose, 1995). I tre coefficienti sono stati calcolati secondo le equazioni:

$$U_{bias} = \frac{n(\bar{O} - \bar{P})^2}{\sum(O-P)^2}; \quad U_{slope} = \frac{(\beta-1)^2 \sum(P-\bar{P})^2}{\sum(O-P)^2}; \quad U_{error} = \frac{\sum(E-O)^2}{\sum(O-P)^2} \quad (1)$$

dove: n è il numero di valutazioni; O e P sono i valori osservati e previsti dell'entità del sintomo su drupa; \bar{O} e \bar{P} sono le medie osservate e previste, rispettivamente; β è la pendenza della regressione lineare ed E sono i valori stimati dalla regressione lineare. La somma dei tre coefficienti è pari a 1.

6.4 Risultati

6.4.1 Ricerca in letteratura

La ricerca in letteratura ha permesso di ottenere un totale di 102 articoli; tra questi, 78 sono stati selezionati in base al titolo e all'abstract e 3 sono stati aggiunti in base ai riferimenti elencati. In definitiva, in questo studio sono stati presi in considerazione oltre 60 lavori.

Nell'elenco delle pubblicazioni esaminate rientrano buona parte delle citazioni sopra menzionate, a cui si aggiungono varie altre, tra i quali si citano: Okoli & Schabram, 2010; Candel, 2014; Okoli, 2015. Gli articoli risultati di diretto ausilio per questo lavoro sono citati nel testo e riportati in bibliografia, per gli altri si rimanda alle citazioni del Capitolo 3.

6.4.2 Analisi dei sistemi del ciclo di vita del complesso di *C. acutatum*

In figura 5 è rappresentato il diagramma relazionale del ciclo di vita del complesso *C. acutatum* in senso lato, gli acronimi sono riportati in tabella 2.

Acronimi	Descrizione	Unità
ACRMAT	acervuli maturi	0/1
CONMAT	conidi maturi negli acervuli	Da 0 a 1
CSPOR	tasso di sporulazione	Da 0 a 1
<i>CSPOR (T)</i>	tasso di sporulazione in funzione della temperatura	Da 0 a 1
<i>CSPOR(WD)</i>	proporzione cumulativa di sporulazione dei conidi in funzione della sola bagnatura fogliare	Da 0 a 1
<i>CSPOR'(WD)</i>	tasso di sporulazione in funzione della bagnatura fogliare	Da 0 a 1
DISP	dispersione dei conidi	0/1
CONDOSE	dose di conidi vitali sulla superficie della pianta	Da 0 a 1
INF	tasso di infezione	Da 0 a 1
<i>INF (T)</i>	tasso di infezione in funzione della temperatura	Da 0 a 1
<i>INF (WD)</i>	proporzione cumulativa di infezione da conidi in funzione della sola bagnatura fogliare	Da 0 a 1
<i>INF' (WD)</i>	tasso di infezione in funzione della bagnatura fogliare	Da 0 a 1
SEVINf	gravità dell'infezione	Da 0 a 1
<i>SEVinf</i>	infezioni cumulate	Da 0 a N
INC	periodo di incubazione	N giorni
VLESi	gravità dele sintomo	Da 0 a 1
SEVles	gravità cumulata dei sintomi	Da 0 a N
GS	fattore di correzione che tiene conto dello stadio di crescita della pianta in base alla scala BBCH	N da 0 a 100
T	temperatura oraria dell'aria	°C
Teq	temperatura equivalente	Da 0 a 1
Tmin	temperatura minima per uno stadio	°C
Tmax	temperatura massima per uno stadio	°C

Tw	temperatura media del periodo umido	°C
P	precipitazioni orarie	mm
UR	umidità relativa	%
DB	numero cumulativo di ore di bagnatura fogliare	N ore
DS	numero cumulativo di assenza di bagnatura fogliare	N ore
Di	numero di giorni necessari per determinare l'evasione	N giorni

Tabella 2: Tabella riepilogativa degli acronimi per le variabili, i tassi e i parametri utilizzati nel modello.

Le fasi principali del ciclo di vita sono le variabili di stato del sistema e all'interno del diagramma sono rappresentate all'interno di rettangoli (Figura 5). La prima variabile di stato del modello consiste nella produzione dell'inoculo, cioè gli acervuli maturi (*ACRMAT*) sviluppati sui frutti, all'interno della chioma dell'olivo, mummificati nel periodo primaverile/estivo e in maturazione nel periodo autunnale/invernale. Non essendo stato possibile quantificare la dose d'inoculo rappresentata dai conidi, in questo

modello si è assunto che l'inoculo si comporti come sorgente continua e si è rappresentata questa variabile sotto forma di nuvola.

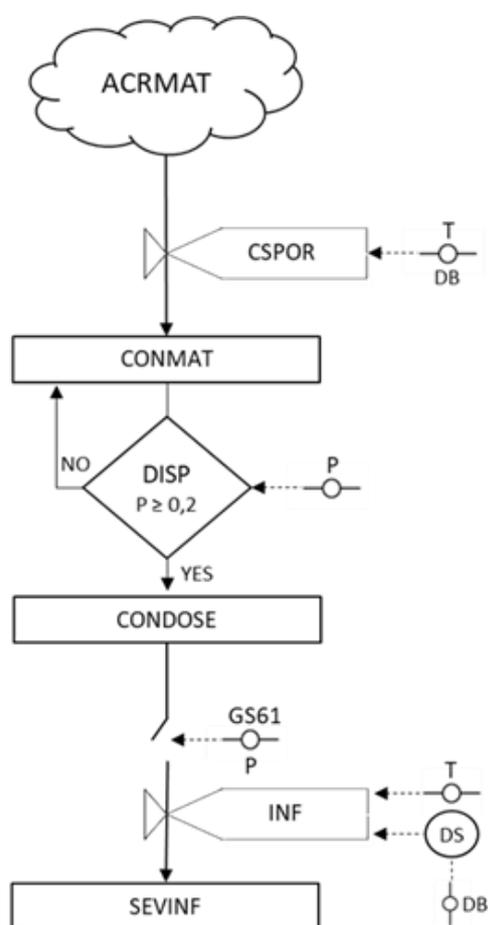


Figura 5: Diagramma relazionale del ciclo di vita di *Colletotricum acutatum*. Legenda: □ variabile di stato; ► flusso e direzione degli stati; -► flusso e direzione dell'informazione; -O-parametro; ○ variabile intermedia; ◇ interruttore; |><|valvola in un flusso (tasso) (vedi Tabella 1 per le spiegazioni degli acronimi)

questa variabile sotto forma di nuvola.

I conidi si formano e maturano progressivamente all'interno degli acervuli, che rappresentano la seconda variabile di stato (*CONMAT*); il tasso di sporulazione (*CSPOR*) regola la produzione di conidi all'interno degli acervuli.

Le piogge primaverili (*R*) innescano il rilascio di conidi maturi che vengono dispersi (*DISP*) sulle drupe sane e fungono da inoculo per la successiva fase di infezione; i conidi che entrano in contatto con i tessuti vegetali sani rappresentano la terza variabile di stato del modello (*CONDOSE*).

Questi conidi, in condizioni favorevoli, causano l'infezione (*INF*) secondo un determinato tasso di infezione (*SEVINF*). Al termine del periodo di incubazione (*INC*), le infezioni da conidi diventano visibili come lesioni necrotiche; la comparsa delle lesioni visibili rappresenta la quinta variabile di stato del sistema (*VLES*). Il flusso da uno stadio al successivo è regolato da tassi (valvole) e interruttori (rombo) che sono influenzati da variabili esterne e ausiliarie, cioè

dalle variabili meteorologiche (temperatura, T in °C; durata della bagnatura, WD in ore; percentuale dell'umidità relativa, RH in %; e precipitazioni, R in mm) e dallo stadio fenologico (GS) (Leffelaar & Ferrari, 1989).

6.4.3 Descrizione del modello

I calcoli del modello iniziano con stadio di crescita (GS) “avvio vegetativo dei germogli” (BBCH 01, secondo la scala di Sanz-Cortés *et al.*, 2002) e terminano alla “raccolta” (BBCH 90; Sanz-Cortés *et al.*, 2002). Il modello ha un passo temporale di 1 ora, per tenere meglio conto dell'effetto della fluttuazione della temperatura e della durata della bagnatura durante il giorno, nonché delle interruzioni della bagnatura.

Il modello presenta tre comparti principali: i) produzione dell'inoculo, ii) infezione causata dall'inoculo, iii) comparsa della lesione.

6.4.3.1 Produzione di inoculo

La fonte primaria di inoculo dell'antracnosi dell'olivo sono gli acervuli, che sono stati osservati principalmente su drupe (Moral *et al.*, 2008; Moral & Trapero, 2012; Moral *et al.*, 2017) e solo in taluni casi e in alcune Regioni anche su foglie e su germogli (Martelli, 1961; Cacciola *et al.*, 2012; Talhinhos *et al.*, 2018). Per le motivazioni sopra riportate, in una visione meccanicistica, nel presente modello la fonte di inoculo si origina dagli acervuli sviluppati dalle sole drupe.

La disponibilità dell'inoculo e l'avvio del modello si verifica con il germogliamento (BBCH 01) (Sanz-Cortés *et al.*, 2002), che determina l'avvio del calcolo della sporulazione oraria dei conidi prodotti dagli acervuli maturi ($ACRMAT$).

Il modello assume una dose stagionale continua e costante di acervuli, generati nella prima fase stagionale a partire da mummie svernanti e nella seconda parte da acervuli evasi in drupe colpite da infezioni primarie. Per quanto precedentemente riportato, $ACRMAT$ è stata posta pari a 1 all'inizio di ogni periodo di sporulazione: le possibili implicazioni dovute a tale ipotesi relativamente all'inoculo saranno affrontate nella Discussione.

I conidi vengono prodotti all'interno degli acervuli secondo il tasso di sporulazione ($CSPOR$), che dipende dalla temperatura (T) e dalla durata della bagnatura (WD).

Il modello inizia un periodo di sporulazione ogni volta che si verifica un'ora di umidità e una temperatura compresa tra 0 e 35°C; la proporzione di conidi che passano da $ACRMAT$ a $CONMAT$ al verificarsi di tali condizioni, viene calcolata come segue:

$$CONMAT = ACRMAT \times CSPOR \quad (2)$$

dove $CSPOR$ è calcolato con le equazioni (4)-(5):

$$CSPOR = CSPOR(T) \times CSPOR'(WD) \quad b \quad (3)$$

L'effetto della temperatura sul tasso di sporulazione è stato calcolato come descritto in J. Moral & Trapero (2012) nella forma seguente:

$$CSPOR(T) = \left(\frac{T_{max} - T_{WD}}{T_{max} - T_{opt}} \right) \times \left(\frac{T_{WD} - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^{\left(\frac{T_{opt} - T_{min}}{T_{max} - T_{opt}} \right)} \quad (4)$$

dove: $CSPOR(T)$, che varia da 0 (non sono stati prodotti conidi fino all'ora i) a 1 (massima produzione di conidi), è il tasso di sporulazione alla temperatura media in °C (T_{WD}) durante il periodo di sporulazione; T_{min} e T_{max} sono rispettivamente la temperatura minima (0°C) e la temperatura massima (35°C) per la sporulazione; T_{opt} è la temperatura ottimale per la sporulazione (22°C). Il confronto tra i dati osservati e quelli previsti ha indicato che (Juan Moral & Trapero, 2012): R^2 (coefficiente di determinazione) è pari a 0,866, R^2_{adj} (Coefficiente di determinazione corretto per i gradi di libertà) è pari a 0,839 e RMS (Errore Quadratico Medio) è pari a 1.248. L'effetto della durata della bagnatura sul tasso di sporulazione è rappresentato da $CSPOR'(WD)$, che è la derivata di primo ordine della seguente equazione:

$$CSPOR(WD) = \frac{1}{1 + e^{(\alpha - \beta \times WD)}} \quad (5)$$

dove: $CSPOR(WD)$ è la proporzione cumulativa di conidi maturi prodotti dagli acervuli, che va da 0 (non sono stati prodotti conidi fino all'ora i) a 1 (massima produzione di conidi); WD è il numero cumulativo di ore con bagnatura delle foglie; α e β sono i parametri dell'equazione. Le stime e gli errori standard dei parametri dell'equazione sono stati $\alpha = 3,609 \pm 0,166$ e $\beta = 0,091 \pm 0,004$; l'equazione (5) è stata sviluppata e parametrizzata adattando i dati di (Moral & Trapero, 2012) con una funzione logistica, con $R^2 = 0,999$.

Se durante il periodo di bagnatura fogliare (WD) viene registrato un tempo di assenza di bagnatura (DP) maggiore o uguale a 4 ore, si determina l'arresto della produzione di conidi, che pone fine al periodo di sporulazione; al contrario, un periodo di assenza di bagnatura fogliare inferiore a 4 ore non determina la fine del periodo di sporulazione; pertanto, il numero di ore cumulate di bagnatura (WD) riprenderà al termine del periodo asciutto (DP).

6.4.3.2 *Dispersione dei conidi*

In questo modello, si assume che la dispersione (*DISP*) dei conidi, che prevede le fasi di rilascio, trasporto, sopravvivenza e deposizione, avvenga esclusivamente ad opera della pioggia, in accordo con gli studi pregressi condotti (Cacciola et al., 2012; Moral et al., 2021). Poiché sono sufficienti pochi decimi di millimetro di pioggia perché si verifichino distacco e dispersione dei conidi (Madden et al., 1996), il modello ipotizza che un evento di dispersione delle spore si verifichi ogni volta che $R \geq 0,2$ mm/h.

Viene inoltre ipotizzato che attraverso un singolo evento piovoso tutti i conidi (*CONMAT*) vengano trasportati sul nuovo tessuto sano dell'ospite (drupe), in tal modo avremo che $CONDOSE = CONMAT$.

6.4.3.3 *Infezione da conidi*

Le infezioni sulle foglie avvengono raramente o, comunque rimangono frequentemente asintomatiche (J. Moral et al., 2008), per cui il modello presuppone che gli organi bersaglio da infettare siano i fiori e le drupe e che, di conseguenza, la pianta diventi ricettiva a nuove infezioni solo dopo l'inizio della fioritura (GS, BBCH 61; Sanz-Cortés et al. 2002).

Un periodo di infezione inizia nella prima ora umida successiva a $R \geq 0,2$ mm e termina quando si verifica un periodo asciutto superiore a 3 ore.

I conidi sugli organi bersaglio (fiori, drupe) determinano l'infezione in funzione del tasso di infezione (*SEVINF*) e di *CONDOSE*, pertanto, il modello determina la gravità dell'infezione combinando, per ogni periodo di infezione, la dose di inoculo disponibile e l'efficienza di infezione del citato inoculo. Il tasso di conidi che causano l'infezione sulla superficie della pianta viene calcolato dal modello come segue:

$$SEVINF = CONDOSE \times INF \quad (6)$$

dove *SEVINF* è calcolato con le equazioni (8)-(9):

$$INF = INF(T) \times INF'(WD) \quad (7)$$

L'equazione del tasso di infezione in funzione della temperatura è formulata come da modello non lineare di Yin (Yin, Kropff, McLaren, & Visperas, 1995; Magarey, Sutton, & Thayer, 2005), come segue:

$$INF(T) = \left(\frac{T_{max} - T_{WD}}{T_{max} - T_{opt}} \right) \times \left(\frac{T_{WD} - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^{\left(\frac{T_{opt} - T_{min}}{T_{max} - T_{opt}} \right)} \quad (8)$$

dove: $INF(T)$ rappresenta il tasso di infezione; T_{WD} è la temperatura media ($^{\circ}C$) del periodo di bagnatura; T_{min} è la temperatura minima per l'infezione ($10^{\circ}C$); T_{max} è la temperatura massima per l'infezione ($25^{\circ}C$); T_{opt} è la temperatura ottimale per l'infezione ($20,4^{\circ}C$). L'equazione (8) è stata sviluppata e parametrizzata per T_{max} , T_{min} e T_{opt} utilizzando i dati di J. Moral *et al.*, 2012b; il confronto tra i dati osservati e quelli previsti ha indicato che $R^2 = 0,765$ (significativo), e residui 0,043.

L'effetto della durata della bagnatura sul tasso di infezione è rappresentato da $INF'(WDi)$, che è la derivata di primo ordine della seguente equazione:

$$INF(WD) = 1 - \gamma \times \delta^{WD} \quad (9)$$

dove: $INF(WD)$ varia da 0 (nessun conidio è risultato infetto fino all'ora i) a 1 (tutti i conidi sono risultati infettivi fino all'ora i); WD è il numero cumulativo di ore di bagnatura della foglia; γ e δ sono i parametri dell'equazione. Le stime e gli errori standard dei parametri dell'equazione sono stati $\gamma = 0,873 \pm 0,129$ e $\delta = 0,855 \pm 0,052$. L'equazione (9) è stata sviluppata e parametrizzata utilizzando i dati di (Moral *et al.*, 2012b), con $R^2 = 0,859$ e residui di 0,132.

L'infezione cumulata (SEV_{inf}) è definita dalla somma di gravità ogni evento infettivo (i) verificatosi durante il periodo vegetativo, come descritto dalla seguente equazione:

$$SEV_{inf} = \sum_0^i SEV_{INFi} \quad (10)$$

6.4.3.4 *Periodo di incubazione*

Come già osservato in precedenza, in letteratura sono stati trovati pochi dati sull'incubazione quanto piuttosto sui tempi di latenza (Loprieno & Tenerini, 1960; Moral *et al.*, 2009; Moral & Trapero, 2012; Schena *et al.*, 2017), pertanto il periodo di incubazione (INC), il tempo trascorso tra l'evento infettivo e la comparsa dei sintomi, è stato determinato utilizzando il metodo della “*Window-Pane Analysis*” (Coakley *et al.*, 1988; Kriss *et al.*, 2010).

Il concetto alla base del metodo “*Window-Pane Analysis*” è la specificazione di una finestra temporale di lunghezza o durata definita in base alla correlazione tra le variabili ambientali e uno stato del ciclo biologico.

Per ogni monitoraggio (i), sono state ipotizzate 9 finestre di incubazione (Δ_{ij}) di diversa durata, tutte con inizio al tempo zero (t_0), corrispondente alla data di un monitoraggio (i). La prima finestra (Δ_{i+1}) ha una durata di un solo giorno, mentre l'ultima (Δ_{i+9}) avrà una durata di 9

giorni; pertanto, le nove finestre differiranno rispetto alla durata per l'incremento di un giorno ciascuna ($\Delta_{ij} = t_j - t_0$).

Per ogni monitoraggio (i), è stato determinato un $\Delta iIND$. e sono stati calcolati 9 diversi $SEV_{inf}(\Delta_{tij})$.

$\Delta_{ij}SEV_{inf}$ è calcolato come la differenza tra $SEV_{inf}(t_i)$ e $SEV_{inf}(t_0)$:

$$\Delta_{ij}SEV_{inf} = SEV_{inf}(t_i) - SEV_{inf}(t_0) \quad (11)$$

L'aumento dell'incidenza della malattia sulle drupe ($\Delta iIND$) è stato determinato per ogni dato di monitoraggio (i) come la differenza tra i valori di incidenza sulle drupe osservati a "t0" (IND_{t_0}) e l'incidenza sulle drupe rilevata nel monitoraggio precedente al tempo "t0" (IND_{t_0-1}):

$$\Delta iIND = IND(t_0) - IND(t_0-1). \quad (12)$$

Infine, per ogni monitoraggio sono stati calcolati i coefficienti di correlazione di rango di Spearman (ρ) tra il $\Delta iIND$ e $i\Delta_{ij}SEV_{inf}$ delle 9 finestre ipotizzate.

La finestra di 5 giorni ha mostrato la più alta correlazione tra $\Delta-IND$ e valori cumulativi di $SEV_{inf}(\Delta_{tij})$, con un coefficiente di correlazione di rango di Spearman (ρ) pari a 0,491, in accordo con quanto riportato da Graniti, 1993 e Kolainis et al., 2020.

Nel modello viene quindi utilizzato un periodo di incubazione di 5 giorni per governare il flusso dal SEV all'evento sintomatologico predetto ($VLES_i$), ovvero la manifestazione dei sintomi sulle drupe.

Le entità delle singole infezioni previste ($VLES_i$) sono state progressivamente sommate ad ogni nuovo evento infettivo, determinando la sommatoria delle infezioni predette (SEV_{les}):

$$SEV_{les} = \sum_0^i VLES_i \quad (13)$$

6.4.4 Validazione del modello

Per la validazione del modello sono state confrontate le 9 stagioni di monitoraggio realizzate tra il 2017 e il 2019 (52 rilievi complessivi), nei 5 oliveti pugliesi riportati nella Tabella 3, e le 9 simulazioni realizzate dal modello, sulla base dei dati meteorologici registrati dalle rispettive stazioni nei diversi anni d'interesse.

Pertanto, per ogni stagione, la validazione del modello è stata eseguita confrontando, per ciascuna data di monitoraggio, SEV_{les} (valore cumulato delle infezioni predette) con l'incidenza dei sintomi sulla drupa (IND_i).

Per rendere i valori confrontabili, la gravità cumulativa dell'infezione prevista dal modello è stata relativizzata al valore finale dell'anno di riferimento, ossia, il valore $SEVles$ è stato relativizzato, mettendo in rapporto il valore giornaliero di $SEVles_j$ e il valore $SEVles_{max}$ ottenuto a fine stagione (valore massimo), determinando il valore $RSEVles$.

$RSEVles$ è quindi il valore relativo calcolato giornalmente come rapporto tra il $SEVles$ giornaliero e il $SEVles$ di fine anno (valore massimo):

$$RSEVles = \frac{SEVles_i}{SEVles_{max}}$$

Per la bontà dell'adattamento dei dati previsti rispetto a quelli osservati nelle 9 epidemie di antracnosi dell'olivo, sono stati utilizzati il coefficiente di correlazione di concordanza (CCC) = 0,887 e l'errore quadratico medio ($RMSE$) = 0,033.

Il modello ha mostrato una tendenza alla sovrastima: coefficiente di massa residua (CRM) = -0,052, (Tabella 3),

Il basso peso degli errori è stato confermato dai bassi valori di $RMSE$ e CRM , il CCC conferma la bontà dell'adattamento del modello alle osservazioni sul campo.

Acronimo monitoraggio	Ave18	Ave19	Lev17	NSn17	Nr17	Nr18	Nr19	Veg17	Veg18	Totale
Numero dei rilievi svolti	4	3	6	6	10	9	7	5	2	52
CCC	0,973	0,706	0,751	0,913	0,913	0,814	0,836	0,987	0,789	0,887
RMSE	0,017	0,026	0,037	0,014	0,014	0,065	0,022	0,010	0,014	0,033
CRM	-0,052	0,167	-0,295	0,076	0,076	0,272	0,105	-0,052	-0,080	0,064
Obs incidence MAX	26	15	18	7	12	33	17	18	15	-

Tabella 4: Analisi statistica dei valori sulle epidemie segnalate dal modello rispetto a quelle reali di campo verificatisi nei diversi oliveti sotto osservazione; CCC=Coefficiente di correlazione di concordanza; RMSE=Errore quadratico medio; CRM= coefficiente di massa residua);

Per confrontare l'accuratezza, è stata utilizzata la regressione dei dati osservati (sull'asse y) rispetto ai dati simulati (sull'asse x) (Piñeiro et al., 2008), (Nieto et al., 2010). Il coefficiente di determinazione della regressione tra i valori osservati (*IND*) e previsti (*RSEVles*) è stato di 0,798 ($n = 52$, $P < 0,001$), la pendenza della regressione lineare è risultata prossima a 1 (0,9111) e l'intercetta prossima a 0 (0,016) (Figura 6).

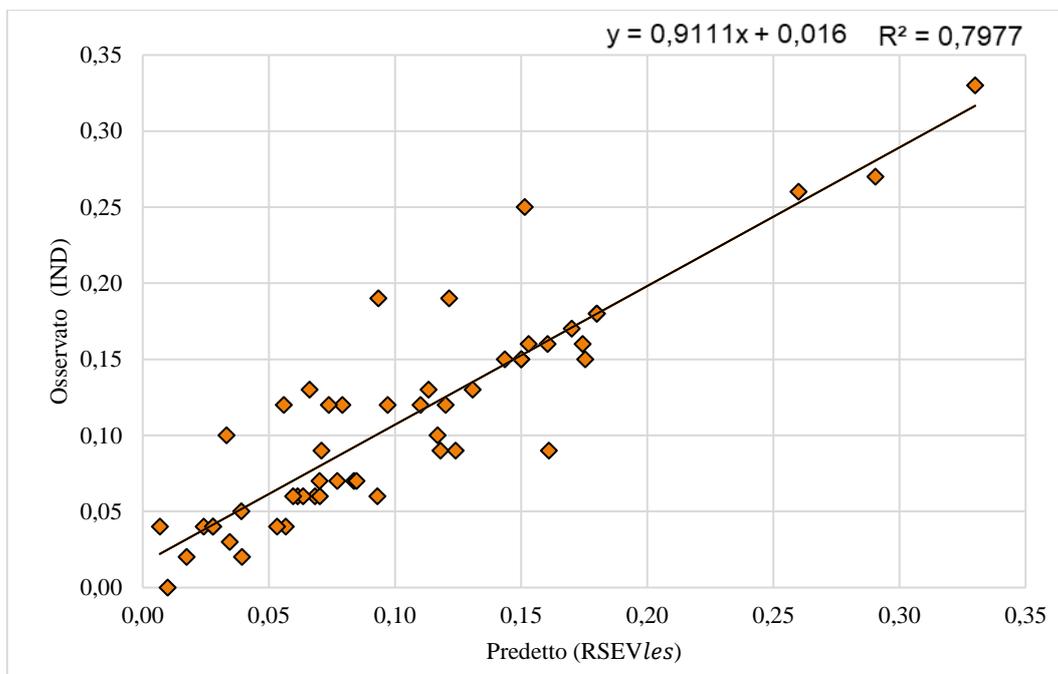


Figura 6: Retta di regressione tra i valori predetti (*RSEVles*) dal modello sull'asse delle ascisse (secondo una scala da 0 a uno) e i valori osservati in campo (*IND*) sull'asse delle ordinate (secondo una scala da 0 a uno), a confronto nei 52 rilievi effettuati nel triennio 2017-2019 nei cinque oliveti sotto osservazione nel Salentino.

Inoltre, essendo il coefficiente di determinazione superiore a 0,7, è stata eseguita la decomposizione dell'errore di Theil (Smith & Rose, 1995).

Infatti, utilizzando la statistica U di Theil (eq.1), come descritto nel paragrafo precedente, è stato possibile scomporre l'errore nei tre coefficienti di disuguaglianza: le differenze medie tra "IND" osservati e "RSEVles" predetti, *Ubias*; le deviazioni dalla linea 1:1, *Uslope*; e la varianza non spiegata, *Ubias*.

Il fatto che la maggior parte dell'errore sia imputabile a *Uerror* indica che il modello non ha tendenza di sovrastima o sottostima nelle previsioni (Tabella 4).

n	R ²	U _{bias}	U _{slope}	U _{error}
52	0,7977	0,04277	0,03464	0,92257

Tabella 5: Valutazione del modello di regressione dell'infezione osservata rispetto all'infezione prevista di *Colletotrichum acutatum*. n, numero di simulazioni; R², coefficiente di determinazione; U_{bias}, differenze tra i conidi aerodispersi osservati e simulati; U_{slope}, deviazioni dalla linea 1:1; U_{error}, varianza non spiegata.

6.4.5 Esempificazioni su tre serie di rilievi (Veg 17, Ave18, Nr19)

Di seguito verrà riportato un dettaglio in merito a tre delle serie di dati più interessanti in riferimento agli anni di monitoraggio 2017, 2018 e 2019.

6.4.5.1 Veglie, stagione 2017 (Veg17)

A Veglie, durante la stagione 2017 (Figura 7) (dal 1° maggio al 31 dicembre) la stazione meteorologica ha registrato una temperatura media giornaliera minima di 4,5°C (19/12/2017) e massima di 31,1°C (29/06/2017). La temperatura media annua è stata di 19,2°C. Le precipitazioni totali durante la stagione sono ammontate a 375,4 mm e non regolarmente distribuite; la maggior parte si è verificata nei mesi da settembre a dicembre. L'autunno è stato piovoso e umido con il mese di novembre che è risultato essere il più piovoso dell'anno, con più della metà della pioggia annuale (199,80 mm). La primavera e l'estate sono state secche, con precipitazioni totali di 29,2 mm e umidità relativa media del 62% da giugno ad agosto. Le precipitazioni sono state nulle a giugno mentre a luglio sono stati registrati solo 1,6 mm.

La prima infezione prevista dal modello si è verificata il 25 maggio 2017, in corrispondenza della fase fenologica BBCH 69 (fine fioritura).

Dopo infezioni nulle in giugno e ridotte in luglio-agosto, a partire da settembre l'intensità della malattia è aumentata gradualmente fino a raggiungere il livello di *RLEVles* di 0,180 alla fine dell'anno, confermato degli incrementi repentini dei sintomi dal 18 al 29 ottobre e dal 07 al 25 novembre determinati dalla presenza di due finestre infettive.

L'aumento massimo di *RSEVles* si è verificato quindi in corrispondenza della diminuzione delle temperature medie e del periodo più piovoso dell'anno, tra ottobre e novembre. Durante la stagione sono stati previsti in totale 70 eventi infettivi.

In campo la malattia è stata osservata fin dal primo monitoraggio effettuato in data 17 luglio, con un'incidenza del 2%, a testimonianza del fatto che vi sono state infezioni nelle prime fasi

di allegazione/sviluppo drupa, e predette dal modello con un *RSEVles* di 0,039. Durante i successivi monitoraggi l'incidenza della malattia è risultata essere del 6%, il 18 settembre, rispetto ad un *RSEVles* del 0,06, del 16% il 23 novembre con *RSEVles* del 0,161 e 7 dicembre (*RSEVles* del 0,174) e del 18% il 21 dicembre, con un *RSEVles* di 0,180.

Detto valore osservato del 18% è in questo caso analogo al *RSEVles* predetto (= 0,18).

Per quanto riguarda la bontà di adattamento della previsione ai dati osservati, il coefficiente di correlazione di concordanza (*CCC*) = 0,987 e l'errore quadratico medio (*RMSE*) = 0,014. Il modello ha mostrato una tendenza alla sovrastima (coefficiente di massa residua (*CRM*) = -0,052).

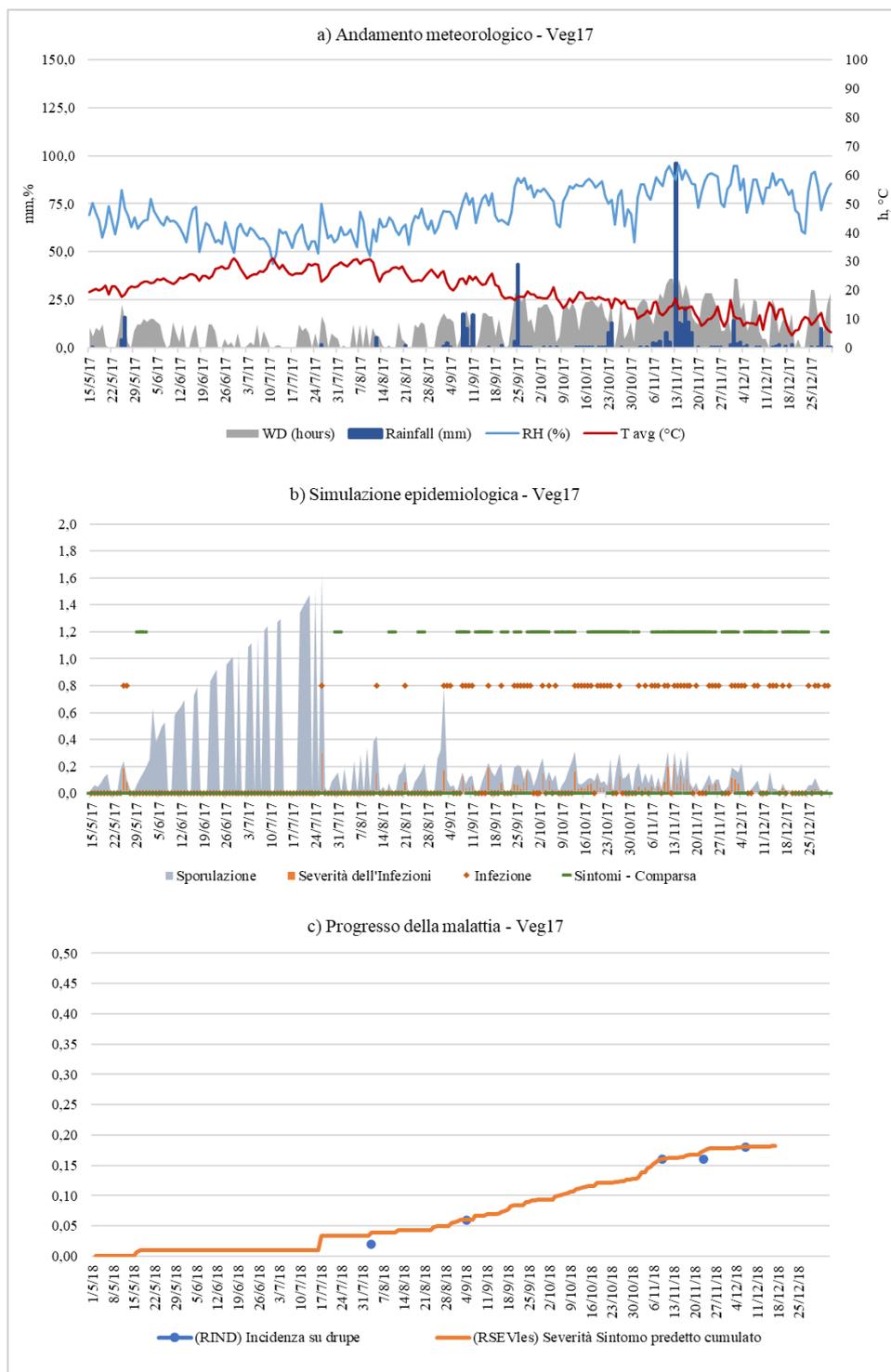


Figura 7 Output del modello per l'oliveto di Nardò nel 2019. (A) Variabili meteorologiche: temperatura dell'aria (T , °C), rappresentata dalla linea continua rossa, precipitazioni (R , mm) rappresentate dagli istogrammi blu, durata della bagnatura fogliare (WD , h) rappresentata dall'area grigia e infine, umidità relativa (RH , %) rappresentata come linea continua blu. (B) Simulazione del modello: la manifestazione dei sintomi sulle foglie prevista dal modello e indicata dalle tacche orizzontali verdi, la severità dell'infezione sulla drupa prevista dal modello e indicata dalle barre arancioni e gli eventi infettivi rappresentati da rombi arancioni. (C) Gravità cumulativa dell'infezione prevista dal modello e relativizzata al valore finale dell'anno (linea continua arancione) e l'incidenza su drupa quantificata nei diversi monitoraggi ed espressa come valore assoluto (cerchi blu).

6.4.5.2 Avetrana, stagione 2018 (Ave18)

Per Avetrana, nel 2018, (Figura 8), l'andamento meteorologico registrato dalla stazione ha mostrato un'estate particolarmente asciutta, con il periodo maggio-settembre caratterizzato da soli 21,6 mm di pioggia e con 14 settimane di siccità. Le precipitazioni totali della stagione (dal 1° maggio al 31 dicembre) sono state di 380,9 mm, concentrate nell'ultima parte dell'anno, da ottobre a dicembre.

In questa simulazione, sebbene il modello abbia previsto una prima importante infezione il 23 agosto, l'entità della malattia (*RSEVles*) è rimasta costante per tutto il mese di agosto, aumentando rapidamente con il verificarsi delle prime piogge autunnali e l'abbassamento delle temperature.

In tale periodo si sono verificati ben 29 eventi infettivi che hanno determinato il raggiungimento del livello massimo di *RSEVles* pari a 0,289.

L'andamento sopra descritto è stato confermato dal monitoraggio effettuato durante la stagione: l'incidenza dell'antracosi sulle drupe il 25 settembre è risultata essere del 7%, corrispondente a un *RSEVles* di 0,082, il 10 ottobre l'incidenza osservata era salita al 9 % coerentemente con un incremento di 0,11 del *RSEVles*, per arrivare poi al 16 % con un *RSEVles* pari a 0,149 in data 28 ottobre.

Infine, nell'ultimo monitoraggio è stata osservata un'incidenza del 26 %, con *RSEVles* predetto pari a 0,253.

I valori statistici misurati per le simulazioni dal modello sono i seguenti: $CCC=0,973$, $RMSE=0,017$ e $CRM = - 0,052$.

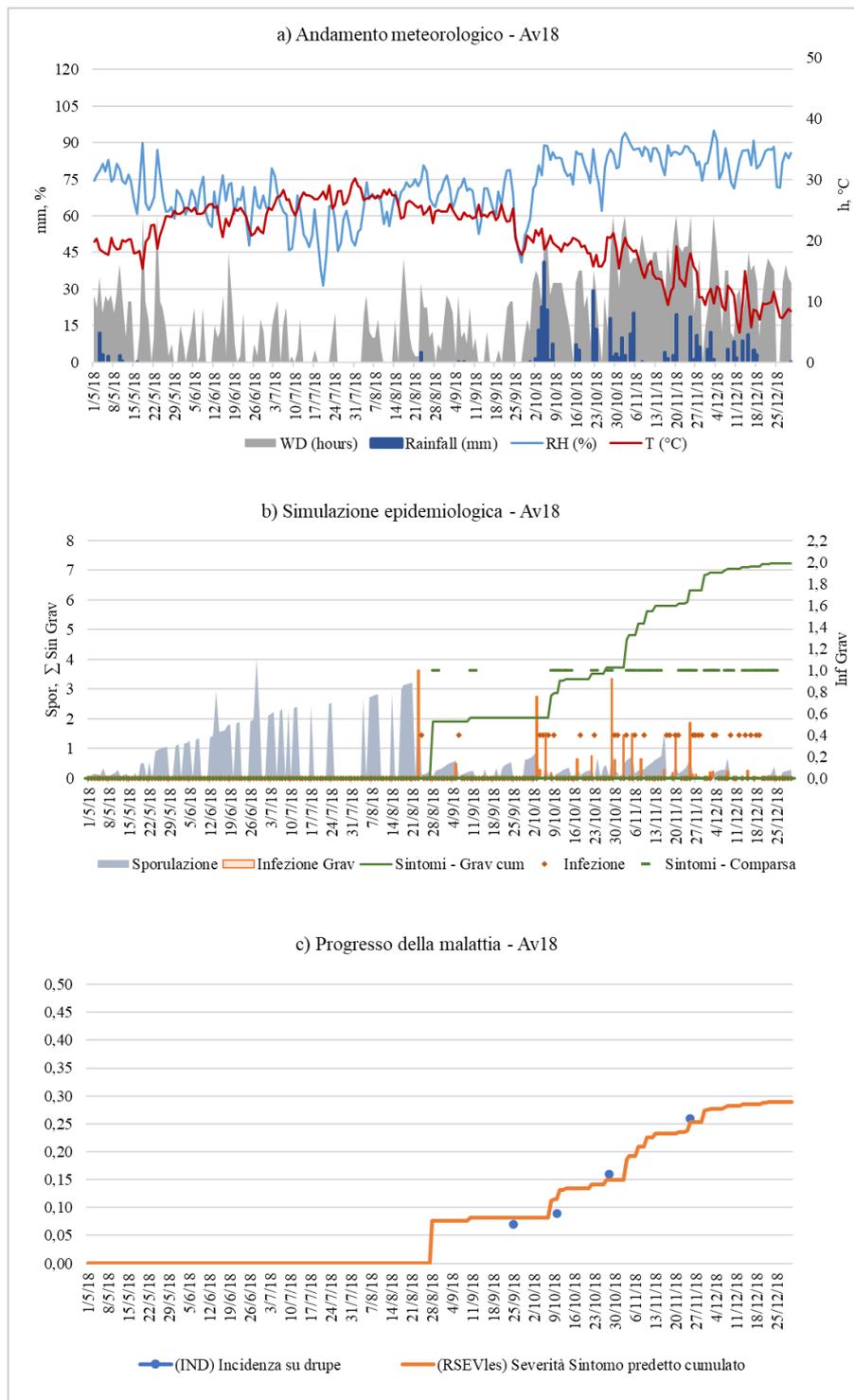


Figura 9: Output del modello per l'oliveto di Nardò nel 2019. (A) Variabili meteorologiche: temperatura dell'aria (T , °C), rappresentata dalla linea continua rossa, precipitazioni (R , mm) rappresentate dagli istogrammi blu, durata della bagnatura fogliare (WD , h) rappresentata dall'area grigia e infine, umidità relativa (RH , %) rappresentata come linea continua blu. (B) Simulazione del modello: la manifestazione dei sintomi sulle foglie prevista dal modello e indicata dalle tacche orizzontali verdi, la severità dell'infezione sulla drupa prevista dal modello e indicata dalle barre arancioni e gli eventi infettivi rappresentati da rombi arancioni. (C) Gravità cumulativa dell'infezione prevista dal modello e relativizzata al valore finale dell'anno (linea continua arancione) e l'incidenza su drupe quantificata nei diversi monitoraggi ed espressa come valore assoluto (cerchi blu).

6.4.5.3 Nardò stagione 2019 (Nr19)

A Nardò nel 2019 (Figura 9), la stazione ha misurato una temperatura giornaliera tra i 7,5°C (27/12/2019) e i 29,9°C (12/08/2019), la primavera è stata mite, mentre l'estate è stata calda e con un mese di luglio relativamente piovoso. Le precipitazioni totali sono state di 374,8 mm, verificatesi principalmente nei mesi di luglio (57,4 mm), novembre (134,2 mm) e dicembre (81 mm).

Durante la stagione, il modello ha previsto 59 infezioni totali, la prima delle quali si è verificata il 9 luglio, in corrispondenza dei principali eventi piovosi. Il *RSEVles*, 0.05 a fine luglio, è aumentato fino a un livello di 0.21 alla fine della stagione, con gli aumenti più consistenti durante il piovoso novembre.

L'incidenza della malattia osservata in oliveto si è mantenuta lievemente maggiore rispetto a quanto previsto dal modello *RSEVles*.

L'incidenza sulle drupe il 6 agosto è risultata essere del 4 %, con *RSEVles* pari a 0.052, il 9 settembre l'incidenza è cresciuta a 12 %, con *RSEVles* pari a 0.07, il 21 ottobre l'incidenza osservata era del 13 % e *RSEVles* era pari a 0.11.

Nell'ultimo monitoraggio, svolto in data 18 novembre, è stata osservata un'incidenza del 17 %, equiparando il valore predetto *RSEVles* di 0.17.

I valori statistici misurati per le infezioni simulata dal modello in questa stazione sono: $CCC=0,836$ con $RMSE=0,010$ e $CRM=0,105$.

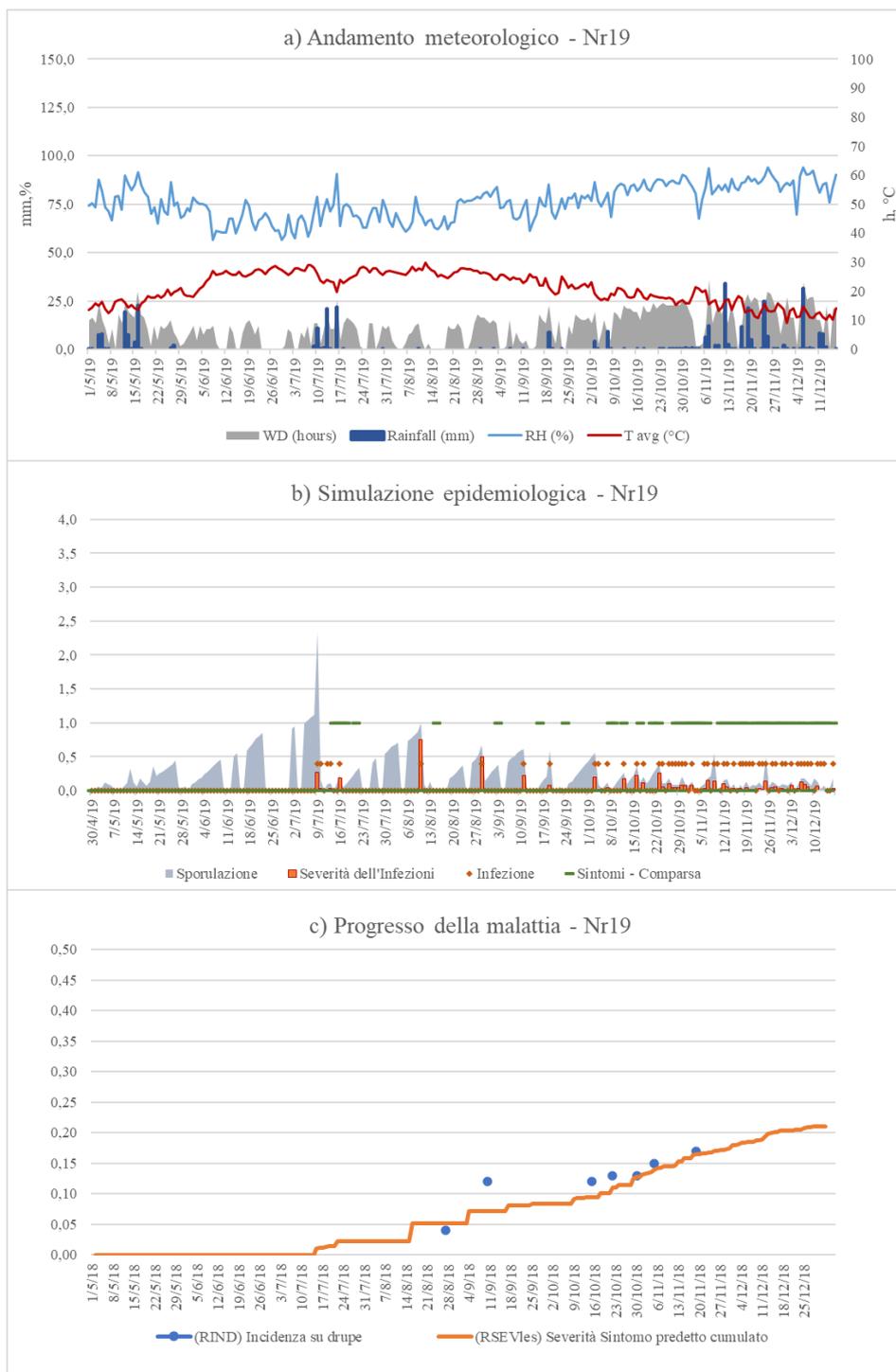


Figura 9: Output del modello per l'oliveto di Nardò nel 2019. (A) Variabili meteorologiche: temperatura dell'aria (T , °C), rappresentata dalla linea continua rossa, precipitazioni (R , mm) rappresentate dagli istogrammi blu, durata della bagnatura fogliare (WD , h) rappresentata dall'area grigia e infine, umidità relativa (RH , %) rappresentata come linea continua blu. (B) Simulazione del modello: la manifestazione dei sintomi sulle foglie prevista dal modello e indicata dalle tacche orizzontali verdi, la severità dell'infezione sulla drupa prevista dal modello e indicata dalle barre arancioni e gli eventi infettivi rappresentati da rombi arancioni. (C) Gravità cumulativa dell'infezione prevista dal modello e relativizzata al valore finale dell'anno (linea continua arancione) e l'incidenza su drupe quantificata nei diversi monitoraggi ed espressa come valore assoluto (cerchi blu).

6.5 Discussione

In questo studio abbiamo sviluppato un modello meccanicistico per l'antracnosi dell'olivo utilizzando le conoscenze disponibili sulla stessa e sul patogeno, procedendo poi alla relativa validazione.

La letteratura è stata la principale fonte di dati riguardanti le relazioni quantitative tra le variabili meteorologiche e i processi epidemiologici, e ha rappresentato una preziosa fonte di informazioni per la modellazione di simulazione (Kranz & Hau, 1980). I lavori di Magarey et al., 2005 e Rossi et al., 2015 sono esempio di come i dati pubblicati possano essere utilizzati per sviluppare e testare relazioni matematiche tra le variabili meteorologiche, come la temperatura e la durata della bagnatura, e i parametri epidemiologici delle malattie delle piante, come ad esempio l'insorgenza di infezioni.

Grazie all'approfondita ricerca di letteratura, abbiamo ottenuto informazioni dettagliate sul ciclo di vita di *C. acutatum* in senso lato e dati sull'effetto delle condizioni atmosferiche (temperatura dell'aria, pioggia e durata della bagnatura fogliare) sul suo sviluppo. La nostra ricerca in letteratura ha anche evidenziato la presenza di conoscenze incomplete su importanti aspetti biologici ed epidemiologici del patogeno e della malattia (es. incubazione e periodo infettivo).

L'attività di ricerca ha dovuto fronteggiare anche l'annosa e complessa identificazione dell'agente eziologico, che negli ultimi anni ha portato alla distinzione dei complessi di specie di *C. acutatum* in senso lato. Pertanto, abbiamo dovuto definire a monte il complesso di specie di *C. acutatum* in senso lato maggiormente riscontrato in Italia e sulla base di questo passo preliminare, selezionare gli articoli di riferimento. Nello sviluppo di un modello, abbiamo quindi affrontato queste lacune di conoscenza facendo ipotesi esplicite e/o utilizzando tecniche particolari, come ad esempio "Window-pane Analysis".

Il modello sviluppato nella presente ricerca, nonostante preveda una semplificazione del ciclo biologico del patogeno, ha dimostrato risultati statisticamente validi.

Esso presenta come prima variabile di stato la formazione degli acervuli maturi su drupe, fonte di inoculo costante nel tempo per le infezioni primarie e secondarie. Questa preliminare ipotesi, che prevede una semplificazione delle variabili di stato legate alla diversa sorgente di inoculo e alle loro rispettive durate, potrebbe portare a previsioni falsamente positive dell'infezione. Tale decisione scaturisce *in primis* dalla lunga persistenza della sorgente d'inoculo svernante, che può arrivare ben oltre il mese di ottobre (Moral & Trapero, 2012) e in secondo luogo, dal fatto che è stato possibile reperire riferimenti bibliografici circa il periodo infettivo (ossia il

periodo di tempo durante il quale una lesione è in grado di produrre sporulazione) per il sistema patogeno di riferimento.

Durante i monitoraggi svolti nel corso di questa ricerca non sono stati riscontrati conidi fungini su foglie e germogli, nonostante ciò, il ruolo di questi organi come fonte di inoculo andrebbe sicuramente approfondito. Infatti, in Spagna (Moral et al., 2009b; Moral et al., 2017) non hanno riscontrato acervuli su tessuti diversi dalle drupe, mentre in Italia gli acervuli sulle foglie sono stati identificati sicuramente nel 1961 e nel 2012 (Martelli, 1961; Cacciola et al., 2012). La presenza degli acervuli sulle foglie e il loro ruolo nel ciclo infettivo e nella patogenesi, ancora non del tutto chiari in relazione ai diversi complessi di specie, dovrebbero pertanto essere approfonditi con attività di ricerca *in vivo* e *in vitro*, al fine di colmare i vuoti conoscitivi in essere. La mancata considerazione nel modello proposto di tale fonte d'inoculo può essere facilmente ovviata considerando le infezioni che si verificano prima della fioritura come in grado di generare acervuli e, quindi, conidi secondari.

La sporulazione dei conidi, nel presente modello, avviene dagli acervuli presenti sulle sole drupe, in coerenza con quanto riportato nel paragrafo precedente, secondo un tasso in funzione della temperatura e della durata della bagnatura fogliare come descritto in Moral & Trapero (2012).

In questo modello si assume che la dispersione, comprendente le fasi di rilascio, trasporto, sopravvivenza e deposizione, avvenga esclusivamente ad opera della pioggia, in accordo con gli studi pregressi condotti (Cacciola et al., 2012; Moral et al., 2021) e che attraverso un singolo evento piovoso tutti i conidi vengono trasportati su nuovo tessuto dell'ospite.

Poiché le infezioni sulle foglie sono difficilmente possibili o, comunque frequentemente asintomatiche (Moral et al., 2008; Moral et al., 2017), il modello presuppone che gli organi bersaglio delle infezioni siano i fiori (Cacciola et al., 2012; Moral et al., 2009b; Sergeeva et al., 2008a) e le drupe, anche perché più rilevanti ai fini di potenziali perdite quali-quantitative. Per questo motivo è stato assunto che la pianta diventi ricettiva a nuove infezioni di antracnosi dopo l'inizio della fioritura (GS, BBCH 61; Sanz-Cortés et al. 2002).

Il modello calcola la gravità dell'infezione combinando, per ogni periodo di infezione, la dose di inoculo disponibile e l'efficienza d'infezione dell'inoculo. Tale efficienza è calcolata da un'equazione sviluppata sulla base dei dati ottenuti da Moral et al. 2012b attraverso esperimenti in ambiente controllato su diverse specie del complesso di *C. acutatum* in senso lato. Nel corso di alcuni monitoraggi in campo svolti durante questo studio, è stata riscontrata una discrepanza tra la gravità dell'infezione prevista e quella effettiva rilevata; questa differenza potrebbe essere stata causata da differenze nella disponibilità di inoculo nell'oliveto rispetto alla disponibilità

di inoculo stimata nel modello, piuttosto che da differenze nella risposta dell'efficienza dell'infezione alla temperatura e alla durata della bagnatura di specie o sottospecie differenti da quello di riferimento per Moral et al., 2012b.

Non essendo stato possibile reperire riferimenti bibliografici chiari in merito all'incubazione, è stata svolta una determinazione attraverso la metodologia della “*Window-pane analysis*”, descritta nei paragrafi precedenti. La durata dell'incubazione è stata fissata pari a 5 giorni dal momento in cui avviene l'infezione, indistintamente dalla fase fenologica in cui essa si verifica. Tale durata seppur necessiti di un maggior approfondimento, sembra aver dato una congrua risposta circa le simulazioni e i dati rilevati.

Il modello non tiene in considerazione le ultime due variabili di stato del ciclo biologico, ovvero il tempo di latenza e il periodo infettivo, in quanto non essenziali al fine della definizione delle epoche di intervento e in quanto non del tutto chiariti da studi pregressi.

Pur tenendo in considerazione le criticità riscontrate, il modello ha fornito una rappresentazione affidabile delle epidemie di *C. acutatum* in senso lato, confermata dal coefficiente di correlazione di concordanza (CCC) = 0,887 e un errore quadratico medio ($RMSE$) = 0,033 per l'avanzamento della malattia. Considerando che il modello è stato convalidato utilizzando dati indipendenti raccolti in più anni in siti diversi e che hanno coinvolto una vasta gamma di livelli di gravità della malattia, il modello può essere considerato accurato (in quanto ha fornito previsioni vicine alla realtà) e robusto (cioè ha fornito previsioni accurate in diversi ambienti e condizioni epidemiologiche) (Rossi et al., 2010). Le previsioni accurate delle epidemie suggeriscono la correttezza delle ipotesi o che, se non del tutto esatte, non hanno ridotto di molto la capacità del modello di fare previsioni corrette. I risultati delle simulazioni modellistiche hanno, altresì, confermato che l'epidemiologia di *C. acutatum in senso lato* spp. è fortemente dipendente dalle condizioni ambientali e dallo stadio fenologico dell'ospite suscettibile, come è stato considerato da numerosi autori (Cacciola et al., 2012; Talhinhos et al., 2018; Moral et al., 2012; Moral et al., 2021).

Tuttavia, sono state individuate delle lacune che influenzano l'accuratezza del modello nelle nostre attuali conoscenze sulla biologia e l'epidemiologia di *C. acutatum* in senso lato, con particolare riferimento al periodo di latenza e al periodo infettivo. In particolar modo, il periodo di latenza è ancora poco esplorato, in quanto la variabile di stato della latenza è stata affrontata in maniera circoscritta per pochi isolati di *C. acutatum* in senso lato (Moral et al., 2009b; Moral et al., 2012), diversi anni fa, in tempi cioè antecedenti alla riclassificazione dei complessi di *Colletotricum* spp.

Per quanto riguarda il periodo infettivo sarebbe interessante, per le diverse specie, non soltanto conoscere la durata ma anche il numero di acervuli prodotti per unità di superficie infetta e le dinamiche di produzione conidiale durante il periodo infettivo.

Queste due variabili dovranno essere esplorate svolgendo prove *in vivo* e *in vitro*, infettando i diversi organi (foglie, germogli, fiori e frutti) in fasi di sviluppo differenti, con diverse specie di agente eziologico e in condizioni meteorologiche differenti, in particolar modo di temperatura e umidità relativa, con lo scopo di quantificare i tempi e durate rispettive.

La struttura del modello, proprio per la sua natura meccanicistica (Kranz & Hau, 1980; Magarey et al., 2005; Rossi et al., 2015), permette di garantire future integrazioni sulla base di nuove variabili definite nel corso dei prossimi passi futuri.

Un ulteriore ed importante passo sarebbe quello di valutare l'uso del modello per programmare le applicazioni di fungicidi e per supportare gli agricoltori nelle loro decisioni sul controllo della malattia. Per perseguire tale obiettivo sarebbe importante ripetere nuove prove di monitoraggio in nuove regioni olivicole, non solo nazionali, andando ad indentificare in maniera univoca l'agente eziologico, con turni di monitoraggio cadenzati ogni settimana ed estendendo l'osservazione alla comparsa dei sintomi e dei segni su tutti gli organi. Turni stretti di monitoraggio permetterebbero di verificare non solamente l'andamento epidemiologico, ma anche la presenza/assenza in campo di falsi negativi (mancata predizione di infezioni reali con riduzione dell'utilità del modello dovuta al fatto che i coltivatori non riuscirebbero a proteggere le colture quando è necessario.) e i falsi positivi (infezioni predette ma non verificate, che influisce sulla salute delle colture, ma può portare a inutili applicazioni di fungicidi.) attraverso la Analisi Bayesiana (Madden, 2006; Yuen & Hughes, 2002; Madden et al., 2007). Sulla base di questi ulteriori lavori di validazione e stabilendo la distinzione tra infezioni leggere, moderate e gravi il modello potrà essere efficacemente utilizzato per programmare i trattamenti fitosanitari.

6.6 Conclusione

Il presente lavoro è stato svolto al fine di comprendere meglio il ciclo vitale e l'epidemiologia di *C. acutatum* in senso lato, agente causale dell'antracnosi dell'olivo.

In letteratura sono riportati molti esempi dell'importanza e dell'utilità di una dettagliata revisione delle metodologie per lo sviluppo di modelli epidemiologici in proposito.

Allo stato attuale, il modello da noi messo a punto, basato sull'approccio dell'analisi di sistema, va a rappresentare uno strumento molto utile per migliorare la conoscenza del sistema patogeno.

Data la sua struttura meccanicistica e la sua dipendenza dalle condizioni meteorologiche e dalla crescita dell'olivo, il modello potrebbe essere utilizzato in futuro, in funzione anche delle attività e delle integrazioni riportate nel capitolo precedente, come strumento predittivo per la gestione della malattia e per programmare i trattamenti fitosanitari.

Potrà essere, altresì, inserito in olivo.net integrandosi con i diversi modelli già presenti in esso (es. modello fenologia della coltura) al fine di fornire informazioni e allerte più complete e di supporto alle decisioni degli utenti di tale *DSS*, in particolare agli agricoltori, per sviluppare una strategia sostenibile di controllo dell'antracnosi dell'olivo nell'ambito dell'approccio *IPM*.

L'uso di modelli predittivi della malattia per una protezione sostenibile delle colture consente agli agricoltori di agire al momento giusto e in modo più efficiente, ottimizzando i metodi di gestione delle colture al fine di ridurre le applicazioni di pesticidi e quindi di minimizzare gli effetti sull'ambiente. Questo porta a ridurre i residui di pesticidi sugli alimenti e a diminuire i costi di produzione. Inoltre, quanto riportato in questa Tesi sarà utile ai ricercatori per migliorare la comprensione del ciclo di vita dei patogeni e delle relazioni tra l'ospite, il patogeno e l'ambiente e per sviluppare studi al riguardo nel prossimo futuro.

6.7 Bibliografia

- Agosteo, G. E., Magnano Di San Lio, G., Cacciola, S. O., & Frisullo, S. (2002). Characterisation of the causal agent of olive anthracnose in southern Italy. *Acta Horticulturae*, 586, 713–716. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.586.152>
- Agosteo, G. E., Sanzani, C. M., Cacciola, S. O., Li, M. G., Nicosia, D., & Schena, L. (2015). Olive leachates affect germination of *Colletotrichum godetiae* conidia and the development of appressoria Giovanni. *Phytopathologia Mediterranea*, 54(2), 241–252. <https://doi.org/10.14601/Phytopathol>
- Analytis, S. (1980). Obtaining of sub-models for modeling the entire life cycle of a pathogen. *Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz*, 87(7), 371–382.
- Antelmi, I., Sion, V., & Nigro, F. (2017). First Report of *Colletotrichum nymphaeae* on Olive in Italy. *Plant Disease*, 103(800), 1–29.
- Cacciola, S. O., Faedda, R., Sinatra, F., Agosteo, G. E., Schena, L., Frisullo, S., & Magnano di San Lio, G. (2012). Olive Anthracnose. *Journal of Plant Pathology*, 94(1), 29–44.

- Caffi, T., Rossi, V., Cossu, A., & Fronteddu, F. (2007). Empirical vs. mechanistic models for primary infections of *Plasmopara viticola*. *EPPO Bulletin*, 37(2), 261–271. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2007.01120.x>
- Candel, J. J. L. (2014). Food security governance: A systematic literature review. *Food Security*, 6(4), 585–601. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0364-2>
- Chattaoui, M., Raya, M. C., Bouri, M., Moral, J., Perez-Rodriguez, M., Trapero, A., Msallem, M., & Rhouma, A. (2016). Characterization of a *Colletotrichum* population causing anthracnose disease on Olive in northern Tunisia. *Journal of Applied Microbiology*, 120(5), 1368–1381. <https://doi.org/10.1111/jam.13096>
- Coakley, S. M., Line, R. F., & McDaniel, L. R. (1988). Predicting stripe rust severity on winter wheat using an improved method for analyzing meteorological and rust data. *Phytopathology*, 78(5), 543–550.
- Damm, U., Cannon, P. F., Woudenberg, J. H. C., & Crous, P. W. (2012). The *Colletotrichum acutatum* species complex. *Studies in Mycology*, 73, 37–113. <https://doi.org/10.3114/sim0010>
- Faedda, R., Agosteo, G. E., Schena, L., Mosca, S., Frisullo, S., Magnano Di San Lio, G., & Cacciola, S. O. (2011). *Colletotrichum clavatum* sp. Nov. identified as the causal agent of olive anthracnose in Italy. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(2), 283–302. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-9547
- Fall, M. L., Van der Heyden, H., Brodeur, L., Leclerc, Y., Moreau, G., & Carisse, O. (2015). Spatiotemporal variation in airborne sporangia of *Phytophthora infestans*: Characterization and initiatives towards improving potato late blight risk estimation. *Plant Pathology*, 64(1), 178–190. <https://doi.org/10.1111/ppa.12235>
- Graniti, A. (1993). Olive scab: a review. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 23, 377–384.
- Graniti, A., Frisullo, S., Pennisi, A. M., & Magnano di San Lio, G. (1993). Infections of *Glomerella cingulata* on olive in Italy. *EPPO Bulletin*, 23, 457–465.
- Kolainis, S., Koletti, A., Lykogianni, M., Karamanou, D., Gkizi, D., Tjamos, S. E., Paraskeuopoulos, A., & Aliferis, K. A. (2020). An integrated approach to improve plant protection against olive anthracnose caused by the *Colletotrichum acutatum* species complex. *Plos One*, 15(5), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233916>

- Kranz, J., & Hau, B. (1980). System analysis in epidemiology. *Phytopathologie Und Angewandte Entomologie*, 83(45), 67–83.
- Kriss, A. B., Paul, P. A., & Madden, L. V. (2010). Relationship between yearly fluctuations in Fusarium head blight intensity and environmental variables: A window-pane analysis. *Phytopathology*, 100(8), 784–797. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-8-0784>
- Leffelaar, P. A., & Ferrari, T. J. (1989). Some elements of dynamic simulations. In R. Rabbinge, S. A. Ward, & H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and systems management in crop protection* (pp. 19–45).
- Lin, L. (1989). A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45(1), 255–268.
- Loprieno, N., & Tenerini, I. (1960). Indagini sul *Gloeosporium olivarum* Alm., agente dalla „lebbra” delle olive. *Journal of Phytopathology*, 39(3), 262–290. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1960.tb01906.x>
- Lourakis, M. I. A. (2005). A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by levmar. *Institute Of Computer Science*, 3, 2. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2009.10.001>
- Madden, L. V., Hughes, G., & Bosch, F. V. D. (2007). *The Study of Plant Disease Epidemics*. The American Phytopathological Society. <https://doi.org/https://doi.org/10.1094/9780890545058>
- Madden, L. V., Xiusheng, Y., & Wilson, L. L. (1996). Effects of Rain Intensity on Splash Dispersal of *Colletotrichum acutatum*. *Phytopathology*, 86, 864–874.
- Madden, L. V. (2006). Botanical epidemiology: Some key advances and its continuing role in disease management. *European Journal of Plant Pathology*, 115(1), 3–23. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-1229-5>
- Magarey, R. D., Sutton, T. B., & Thayer, C. L. (2005). A Simple Generic Infection Model for Foliar Fungal Plant Pathogens. *Phytopathology*, 95, 92–100. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0092>
- Martelli, G. P. (1961). Acervuli di *Gloeosporium olivarum* Alm. su foglie di olivo. *Phytopathologia Mediterranea*, 1, 125–128.

- Martín, M. P., & García-Figueres, F. (1999). *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* cause anthracnose on olives. *European Journal of Plant Pathology*, *105*(8), 733–741. <https://doi.org/10.1023/A:1008785703330>
- Moral, J., Agustí-Brisach, C., Raya, M. C., Jurado-Bello, J., López-Moral, A., Roca, L. F., Chattaoui, M., Rhouma, A., Nigro, F., Sergeeva, V., & Trapero, A. (2021). Diversity of *colletotrichum* species associated with olive anthracnose worldwide. *Journal of Fungi*, *7*(9). <https://doi.org/10.3390/jof7090741>
- Moral, J., Bouhmidi, K., & Trapero, A. (2008). Influence of fruit maturity, cultivar susceptibility, and inoculation method on infection of olive fruit by *Colletotrichum acutatum*. *Plant Disease*, *92*(10), 1421–1426. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-10-1421>
- Moral, J., De Oliveira, R., & Trapero, A. (2009). Elucidation of the disease cycle of olive anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum*. *Phytopathology*, *99*(5), 548–556. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-5-0548>
- Moral, J., De Oliveira, R., & Trapero, A. (2009b). Elucidation of the disease cycle of olive anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum*. *Phytopathology*, *99*, 548–556. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-5-0548>
- Moral, J., Jurado-Bello, J., Sánchez, M. I., De Oliveira, R., & Trapero, A. (2012). Effect of Temperature, Wetness Duration, and Planting Density on Olive Anthracnose Caused by *Colletotrichum* spp. *Phytopathology*, *102*(10), 974–981. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-11-0343>
- Moral, J., & Trapero, A. (2009). Assessing the susceptibility of olive cultivars to anthracnose caused by *colletotrichum acutatum*. *Plant Disease*, *93*(10), 1028–1036. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1028>
- Moral, J., & Trapero, A. (2012). Mummified fruit as a source of inoculum and disease dynamics of olive anthracnose caused by *Colletotrichum* spp. *Phytopathology*, *102*(10), 982–989. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-11-0344>
- Moral, J., Xaviér, C. J., Viruega, J. R., Roca, L. F., Caballero, J., & Trapero, A. (2017). Variability in susceptibility to anthracnose in the world collection of olive cultivars of Cordoba (Spain). *Frontiers in Plant Science*, *8*(1892), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01892>

- Moral, Juan, & Trapero, A. (2012). Mummified fruit as a source of inoculum and disease dynamics of olive anthracnose caused by *Colletotrichum* spp. *Phytopathology*, *102*(10), 982–989. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-11-0344>
- Mosca, S., Li Destri Nicosia, M. G., Cacciola, S. O., & Schena, L. (2014). Molecular analysis of *Colletotrichum* species in the carposphere and phyllosphere of olive. *PLoS ONE*, *9*(12), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114031>
- Nash, J. ., & Sutcliffe, J. . (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles [Article]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, *10*(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nieto, H., Aguado, I., Chuvieco, E., & Sandholt, I. (2010). Dead fuel moisture estimation with MSG-SEVIRI data. Retrieval of meteorological data for the calculation of the equilibrium moisture content. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(7–8), 861–870. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.007>
- Nigro, F., Antelmi, I., & Sion, V. (2017). Lebbra dell’olivo epidemiologia e strategie di difesa. *L’Informatore Agrario*, *24*, 57–61.
- Okoli, C. (2015). A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Communications of the Association for Information Systems*, *37*(43), 879–910. <https://doi.org/10.17705/1cais.03743>
- Okoli, C., & Schabram, K. (2010). Working Papers on Information Systems A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research. *Sprouts*, *10*(26), 1–50. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1954824>
- Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, *216*(3–4), 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006>
- Ricciolini, M., & Rizzo, D. (2010). *Avversità dell’ olivo e strategie di difesa in Toscana* (R. Toscana (Ed.)). Arsia.
- Romero, J., Moral, J., Gonzalez-dominguez, E., Agustí-brisach, C., Roca, L. F., Rossi, V., & Trapero, A. (2021). Logistic models to predict olive anthracnose under field conditions. *Crop Protection*, *148*. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105714>
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop*

- Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rossi, V., Onesti, G., Legler, S. E., & Caffi, T. (2015). Use of systems analysis to develop plant disease models based on literature data: grape black-rot as a case study. *European Journal of Plant Pathology*, *141*(3), 427–444. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0553-z>
- Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., & Meier, U. (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Annals of Applied Biology*, *140*(2), 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00167.x>
- Savary, S., & Willocquet, L. (2014). Simulation Modeling in Botanical Epidemiology and Crop Loss Analysis. *The Plant Health Instructor*. <https://doi.org/10.1094/phi-a-2014-0314-01>
- Schena, L., Abdelfattah, A., Mosca, S., Li Destri Nicosia, M. G., Agosteo, G. E., & Cacciola, S. O. (2017). Quantitative detection of *Colletotrichum godetiae* and *C. acutatum* sensu stricto in the phyllosphere and carposphere of olive during four phenological phases. *European Journal of Plant Pathology*, *149*(2), 337–347. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1185-x>
- Sergeeva, V., Nair, N. G., & Spooner-Hart, R. (2008a). Evidence of early flower infection in olives (*Olea europaea*) by *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* causing anthracnose disease . *Australasian Plant Disease Notes*, *3*(1), 81. <https://doi.org/10.1071/dn08032>
- Sergeeva, V., Nair, N. G., & Spooner-Hart, R. (2008b). Evidence of early flower infection in olives (*Olea europaea*) by *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* causing anthracnose disease. *Australasian Plant Disease Notes*, *3*, 81–82. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2004.17.12.1394>
- Smith, E. P., & Rose, K. A. (1995). Model goodness-of-fit analysis using regression and related techniques. *Ecological Modelling*, *77*(1), 49–64. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)E0074-D](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)E0074-D)
- Spearman, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, *100*(3–4), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1422689>
- Stevenson, M., Nunes, T., Sanchez, J., Thornton, R., Reiczigel, J., Robison-Cox, J., & Sebastiani, P. (2013). An R Package for the Analysis of Epidemiological Data. *EpiR*, 9–43.
- Talhinhas, P., Loureiro, A., & Oliveira, H. (2018). Olive anthracnose: a yield- and oil quality-degrading disease caused by several species of *Colletotrichum* that differ in virulence, host

- preference and geographical distribution. *Molecular Plant Pathology*, 19(8), 1797–1807. <https://doi.org/10.1111/mpp.12676>
- Talhinhas, P., Mota-Capitão, C., Martins, S., Ramos, A. P., Neves-Martins, J., Guerra-Guimarães, L., Várzea, V., Silva, M. C., Sreenivasaprasad, S., & Oliveira, H. (2011). Epidemiology, histopathology and aetiology of olive anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* in Portugal. *Plant Pathology*, 60, 483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02397.x>
- Talhinhas, P., Sreenivasaprasad, S., Neves-Martins, J., & Oliveira, H. (2005). Molecular and phenotypic analyses reveal association of diverse *Colletotrichum acutatum* groups and a low level of *C. gloeosporioides* with olive anthracnose. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(6), 2987–2998. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.6.2987-2998.2005>
- Trapero, A., & Blanco, M. (2004). Enfermedades. In D. Barranco, R. Fernandez-Escobar, & R. Rallo (Eds.), *El cultivo del olivo 5ª ed.* (pp. 557–614). Mundi-Prensa. <http://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/34199>
- Vandaele, W. (1983). *Applied Time Series and Series and Box - Jenkins Models*. Academic Press.
- Wickham, H. (2019). *Modelr: Modelling Functions that Work with the Pipe*. R Package Version 0.1, p. 4. Available online: <https://rdr.io/cran/modelr/man/modelr-package.html> (accessed on 20 October 2020).
- Wolfinger, R. D. (1996). Heterogeneous Variance-Covariance Structures for Repeated Measures Author. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistic*, 1(2), 205–230. <https://www.jstor.org/stable/1400366%0AJSTOR>
- Yuen, J., & Hughes, G. (2002). Bayesian analysis of plant disease prediction. *Plant Pathology*, 51(4), 407–412. <https://doi.org/10.1046/j.0032-0862.2002.00741.x>
- Scopus (<https://www.scopus.com>)
- Web of Science (<https://apps.webofknowledge.com>)
- Google Scholar (<https://scholar.google.it>)
- Graph Grabber v2.0.4 (<https://www.quintessa.org/software/downloads-and-demos/graph-grabber-2.0.2>),

CAPITOLO 7 – SVILUPPO E VALIDAZIONE DELLA FUNZIONE DI SPORULAZIONE DELL’OCCHIO DI PAVONE

L’Occhio di Pavone, conosciuto anche come Vaiolo o Cicloconio dell’Olivo, è la più importante e comune malattia dell’olivo (Wilson & Miller, 1949; Goidanich, 1978; Ferrari et al., 1999; Alfei et al., 2016; Romero et al., 2018). Tale malattia, provocata dal fungo *Venturia oleaginea*, può determinare danni rilevanti se non correttamente gestita (Obanor, 2006; Romero et al., 2018).

L’agente eziologico può attaccare tutte le parti verdi della pianta, dalle drupe ai peduncoli, ma gli attacchi più significati si hanno sulle foglie, in particolare sulla pagina superiore (Wilson & Miller, 1949). Il danno è funzione all’entità dell’attacco ed è determinato dalla progressiva defogliazione delle piante che si riflette negativamente sul vigore vegetativo della pianta.

Nel caso in cui la defogliazione si verifichi prima della differenziazione a fiore delle gemme ascellari, può determinare, nell’anno successivo, una sensibile diminuzione della fruttificazione e un conseguente aumento dei macroblasti (Morettini, 1951; Castellani, 1952). La sofferenza delle piante può tradursi anche in una ridotta crescita e qualità dei frutti fino a determinare perdite complessive di produzione in olive che possono raggiungere anche il 50-60%. La difesa dagli attacchi da parte dell’occhio di pavone può fare innanzitutto perno sulle scelte agronomiche e d’impianto, infatti, come spesso accade per le malattie fungine, i danni maggiori si osservano in oliveti con sesto d’impianto particolarmente fitto e di conseguenza scarsamente ventilato (Graniti 1993).

Tuttavia, i sestri di impianto ampi non sono compatibili con piantagioni moderne e intensive, e i fungicidi chimici rimangono il principale metodo di controllo della malattia dell’olivo in tutte le regioni olivicole del mondo (Lopez Villalta, 1999).

Poiché l’infezione delle foglie si verifica durante i periodi umidi, il successo della prevenzione dell’infezione con i fungicidi protettivi dipende in larga misura dalla tempestività dell’applicazione dello spray. Pertanto, il numero e la tempistica delle applicazioni fungicide possono variare notevolmente in base alle condizioni stagionali locali (Wilson & Miller, 1949). In tale contesto, assumono grande rilevanza i sistemi di supporto alle decisioni per guidare l’agricoltore in una gestione attenta delle infezioni primarie, che per malattie policicliche come

l'occhio di pavone, risultano fondamentali per il controllo dell'epidemia durante l'intera stagione.

Per questo motivo, di tutte le fasi del ciclo biologico dell'Occhio di Pavone, già dettagliatamente descritte (come vari altri aspetti biologici e sintomatologici) nel terzo capitolo e riportate in figura 1, è fondamentale che il sistema fornisca un allarme accurato in vista della sporulazione che dà inizio al ciclo primario della malattia.

La principale fonte di inoculo di *V. oleaginea* per l'infezione primaria sono le lesioni sulle foglie che possono produrre prontamente inoculo dopo la pioggia o un periodo di elevata umidità (Prota, 1995).

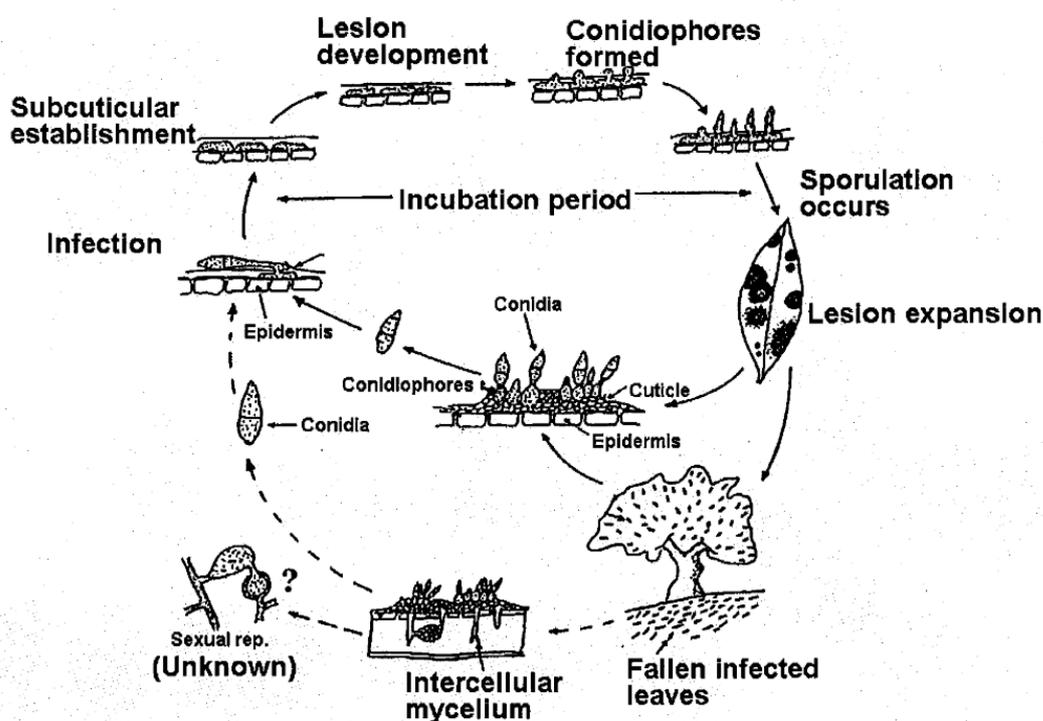


Figura 8: Ciclo biologico del fungo *Venturia oleaginea* Da: Obanor, 2006

Nel ciclo infettivo una delle fasi cruciali risulta essere proprio la sporulazione, nelle sue diverse declinazioni (sviluppo e sopravvivenza della sporulazione delle lesioni). In primavera, un gran numero di conidi di *V. oleaginea* può essere prodotto dalle lesioni fogliari svernanti, ma c'è un'alta variabilità nel tempo nel numero e nella vitalità dei conidi disponibili negli oliveti (Guechi & Girre, 1994).

Graniti (1993) ha riferito che l'infezione e lo sviluppo delle lesioni sono influenzati dalle condizioni ambientali e dallo stadio di sviluppo stagionale degli alberi. Tuttavia, questa comprensione si basa in gran parte su osservazioni generali, come quelle di Miller (Miller, 1949), che riportava che in California le lesioni fogliari, apparse in inverno e all'inizio della

primavera, continuavano a ingrandirsi e a svilupparsi per tutta la primavera fino all'inizio dell'estate. Queste lesioni, che apparivano come macchie scure ben definite in inverno e primavera, continuavano a produrre abbondanti conidi mentre si espandevano, spesso coalizzandosi fino a coprire ampie aree della superficie fogliare. All'inizio dell'estate, le foglie infette mostravano lesioni scure con lievi aloni intorno alle macchie, ma da queste venivano prodotti pochi conidi. Durante le estati calde e secche le lesioni hanno smesso di espandersi e talvolta sono diventate secche, indurite, screpolate o vescicate, con la cuticola che si stacca al centro delle lesioni.

6.1 Obiettivi della ricerca

L'obiettivo generale di questa ricerca, all'interno del percorso di Dottorato, è stato quello di migliorare la comprensione dei fattori che influenzano lo sviluppo dell'occhio di pavone negli oliveti italiani e di integrare tali conoscenze nel modello epidemiologico presente all'interno di olivo.net.

Un primo passo è stato quello di verificare, attraverso la ricerca in letteratura, la possibilità di adottare una funzione alternativa a quella già presente nel sistema olivo.net. Un secondo obiettivo, ancor più importante, è stato quello di valutare in campo gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla sporulazione e sull'espansione delle lesioni di *V. oleaginea*, onde validare attraverso prove sperimentali di campo nel contesto geografico italiano, coadiuvate da analisi di laboratorio, la bontà delle funzioni individuate.

La validazione permetterà successivamente l'integrazione della nuova funzione nel modello meccanicistico dell'occhio di pavone presente in olivo.net.

7.2 Materiali e metodi

7.2.1 Ricerca in letteratura

Un'accurata analisi della letteratura è stata sviluppata seguendo le varie pubblicazioni che ci potevano essere di aiuto per recuperare le più complete e approfondite informazioni documentate sulla biologia, sull'ecologia, sull'epidemiologia, sulle fasi del ciclo biologico e sulla relativa correlazione con i fattori ecologici di *V. oleaginea*. Sono state, altresì, indagate le principali metodologie di monitoraggio epidemiologico e fitopatologico del patogeno.

La ricerca della letteratura è stata effettuata nelle banche dati bibliografiche digitali *Scopus* (<https://www.scopus.com>), *Web of Science* (<https://apps.webofknowledge.com>) e *Google Scholar* (<https://scholar.google.it>), conclusa il 1° novembre 2020.

Per essere presi in considerazione, gli articoli dovevano soddisfare i seguenti criteri: i) essere scritti in inglese o italiano; ii) contenere dati originali sulla biologia, l'ecologia, l'epidemiologia o monitoraggio del patogeno; iii) contenere dati originali sull'interazione tra il patogeno, l'ambiente e l'olivo; iv) essere pubblicati su riviste, atti o in altre forme, compresi rapporti o siti web di autorità/organizzazioni competenti.

Sulla base di questi criteri, sono state formulate query specifiche per la ricerca di articoli accademici, recensioni, articoli in stampa e documenti di conferenze nei tre database bibliografici digitali. La ricerca è stata limitata a titoli, abstract e parole chiave. La ricerca è stata effettuata combinando le seguenti parole chiave: i) *Spilocaea oleaginea*; ii) *Venturia oleaginea*; iii) *Fusicladium oleagineum*; iv) occhio di pavone dell'olivo o occhio di pavone o epidemiologia o patologia; v) ciclo vitale o sporulazione o dispersione o germinazione o infezione o conidi o fonte di svernamento o modello o previsione o simulazione.

Gli articoli sono stati prima esaminati e selezionati sulla base delle informazioni contenute nel titolo e nell'abstract. Il testo completo di ogni articolo selezionato è stato poi letto e rivisto. Ulteriori articoli sono stati selezionati dai riferimenti degli articoli così individuati; anche questi articoli sono stati recuperati e revisionati.

7.2.2 Prova in campo

Gli effetti integrati della produzione, della dispersione, della deposizione, della sopravvivenza e dell'infettività dell'inoculo si manifestano nella gravità della malattia che esso è in grado di causare nelle condizioni specifiche dei fattori ambientali e dell'ospite (Zadoks & Schein, 1978). La valutazione di queste componenti e dei loro effetti integrati è spesso così difficile da esaminare tanto da costituire le "scatole nere" di molte analisi epidemiologiche. Non esistono tecniche di ricerca in grado di eliminare completamente queste scatole nere. Tuttavia, esistono alcuni approcci diretti e indiretti che possono migliorare la valutazione quantitativa delle singole componenti e della loro azione integrata. La produzione dell'inoculo, la sua dispersione, la sopravvivenza, ecc. dovrebbero essere studiati principalmente in campo, perché nelle camere di crescita, alcune condizioni ambientali come il vento e l'irraggiamento sono difficili o impossibili da simulare; alcune osservazioni richiedono un periodo sperimentale troppo lungo per il normale sviluppo dell'ospite nelle camere di crescita (Rotem, 1988). Tuttavia, lo studio

di alcuni argomenti può, e in molti casi dovrebbe, essere coadiuvato da esperimenti in condizioni controllate.

Partendo da questa preliminare considerazione, si è proceduto a pianificare e realizzare una prova di campo, con il principale obiettivo di studiare la sporulazione dell'inoculo, per arrivare infine alle infezioni, in un contesto reale che tenesse conto di tutti fattori ecologici di tali processi (es le radiazioni solari).

Le prove sono state condotte in un oliveto commerciale di Foggia (41°30'01.0"N 15°31'08.7"E), Puglia, con piante mediamente di 30 anni di età, avente sesto d'impianto 7m x 7m, di cultivar Coratina. All'interno dell'oliveto, noto per ricorrenti attacchi di occhio di pavone, è stato individuato un gruppo di nove piante a cui non è stato applicato alcun prodotto fitosanitario nel corso della stagione; tra tali piante ne sono state selezionate casualmente tre considerate come unità sperimentale (Figura 2).



Figura 9: Panoramica dell'oliveto (cv. Coratina) individuato per la prova sperimentale.

Per la registrazione dei dati meteorologici, è stata utilizzata una stazione meteorologica "iMeteos 3.3" (Pessl Instruments GmbH, Weiz, Austria), situata a una distanza di 500 metri dall'impianto con sensori a 1,8 m dal suolo, per la misurazione su base oraria di: temperatura, umidità relativa, bagnatura fogliare e precipitazioni.

Monitoraggio della sporulazione e dispersione delle spore

Nell'oliveto sopra descritto sono state condotte principalmente due attività sperimentali che hanno previsto l'adozione di: i) “piante trappola” (Rotem, 1988) e di ii) “collettori di pioggia” (Ooka & Kommnedahl, 1977; Lops et al., 1993; González-Domínguez et al., 2015; Amponsah et al., 2009; Carisse et al., 2007) (Figura 3).



Figura 10: Astone di quattro anni di età (a sinistra) utilizzato per la prova “piante trappola”, posizionato sotto una delle piante selezionate come replica. Collettore di pioggia (a destra) utilizzato per quantificare il numero di conidi depositati e sopravvissuti al distacco dalla fonte di inoculo.

La prova con “piante trappola”, iniziata il 24 marzo 2020 e terminata il 7 dicembre 2020, ha previsto l'adozione di astoni (cultivar Coratina) in vaso di quattro anni di età, con l'obiettivo di catturare le spore prodotte dalle piante di pieno campo durante i singoli eventi piovosi (Rotem, 1988), e tenendo conto degli effetti integrati dei fattori che si riflettono in un'infezione naturale. È stato altresì verificato, prima dell'inizio della sperimentazione, che suddetti astoni non presentassero sintomi di occhio di pavone e fossero sani, aspetti quest'ultimi garantiti non solo da accurati controlli visivi preliminari, ma anche dal fatto che, fatta eccezione del periodo di esposizione in pieno campo, gli stessi sono sempre stazionati in ambiente protetto.

Sotto la chioma di ciascuna delle tre piante replica sono state disposte tre piante trappola, con l'obiettivo di garantirne l'esposizione alla potenziale sorgente d'inoculo. Le triplette, identificate con un cartellino recante data e replica, venivano posizionate di mattina a un'ora nota e sostituite con una nuova tripletta, solo al termine di ogni evento piovoso.

Concluso il periodo di esposizione all'evento piovoso di pieno campo, le triplete sono state spostate all'interno di una serra lontano da ulteriori fonti di inoculo. A partire dal decimo giorno di esposizione alla fonte di inoculo, le piante sono state monitorate con cadenza bi-settimanale (lunedì e giovedì), per monitorare lo stadio fenologico e la comparsa dei sintomi, valutandone incidenza e gravità su foglia (Figura 4).

Il monitoraggio è stato svolto osservando 33 foglie scelte in maniera casuale (Figura 4), per ogni pianta trappola di ciascuna tripletta esprimendo l'incidenza come percentuale di foglie colpite (foglie malate su foglie totali osservate x 100), e definendo la gravità sulla base della scala proposta da (Rhimini et al., 2014; Sachet et al., 2017).

Sono state utilizzate 33 triplete di astoni per altrettanti periodi piovosi verificatisi durante il periodo della prova sperimentale.

La scala BBCH (Sanz-Cortés et al., 2002) è stata utilizzata come riferimento per stimare lo stadio fenologico prevalente.



Figura 11: Dopo l'esposizione all'inoculo in campo le piante sono state spostate all'interno di un ambiente protetto (a sinistra) per valutare l'incubazione e la comparsa dei sintomi. A partire dal decimo giorno di esposizione le piante sono state monitorate con cadenza bi-settimanale rilevando incidenza e gravità dei sintomi di occhio di pavone sulle foglie (a destra).

I risultati ottenuti tramite questa prova indicano il valore relativo di deposizione e sopravvivenza dell'inoculo in un singolo evento piovoso; tuttavia, non forniscono indicazioni in merito al numero di spore effettivamente depositate e sopravvissute: per questo sono stati adottati anche i "collettori di pioggia" (Figura 5) da utilizzare come confronto con quanto osservato sulle piante trappola.

I collettori di pioggia sono stati disposti sotto la chioma delle piante replica in pieno campo in corrispondenza delle piante trappole, ad un'altezza di 1,6 m da terra e prossimi alle foglie che presentavano sintomi conclamati di occhio di pavone (Figura 5).

I collettori di pioggia erano formati da un flacone sterile da laboratorio a bocca larga, dal volume di 500 ml, in cui era inserito un imbuto di plastica del diametro di 15 cm. È stato realizzato un foro nel tappo del flacone per permettere l'ingresso dell'imbuto e la giunzione tra le due parti è stata poi sigillata con cura utilizzando del mastice (Figura 6a).

Ogni qualvolta venivano posizionate le piante trappola venivano collocati anche i tre nuovi collettori di pioggia (Figura 6b).



Figura 12: Disposizione delle piante trappola e dei collettori di pioggia, posizionati in prossimità degli astoni.

A conclusione di ogni evento piovoso, contestualmente alla sostituzione delle piante trappola, anch'essi venivano sostituiti, prelevando quelli contenenti la precipitazione raccolta.

I campioni rimossi venivano poi sigillati e identificati, indicando il numero della replica, la fase fenologica, la data di inizio e fine esposizione (Figura 6c).

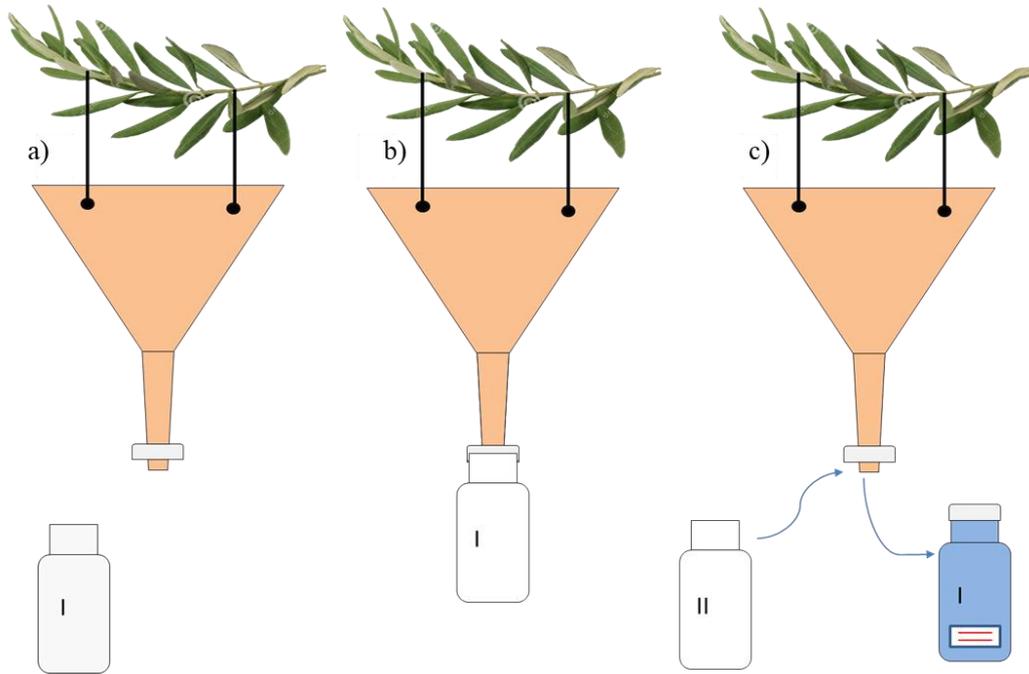


Figura 13 Principali fasi previste per il monitoraggio della dispersione delle spore, attraverso un captaspore splashborne. Per ogni pianta campione sono stati posizionati tre captaspore in prossimità delle piante trappola. a) per realizzare un collettore atto a catturare i conidi distaccati dalla pioggia sono stati utilizzati un flacone da laboratorio di 500 ml e un imbuto del diametro di 15 cmb): il flacone viene posizionato sotto l'imbuto e accuratamente sigillato con il mastice; c) dopo ogni evento piovoso i flaconi vengono rimossi e identificati attraverso un'etichetta di riconoscimento.

Successivamente, dopo un'accurata agitazione per riportare in sospensione i conidi, sono stati prelevati da ciascun flacone 3 campioni di liquido da 1,5 ml ciascuno e trasferiti in una provetta Eppendorf per la conservazione in freezer. Le provette Eppendorf sono state a loro volta sigillate e identificate con un codice univoco che riportasse i dati del campione originale: numero della replica, fase fenologica, data di inizio e fine esposizione.

La presenza e la quantificazione dei conidi potenzialmente raccolti dai collettori sono state effettuate utilizzando una camera di Bürker e osservati allo stereoscopio con ingrandimento 40×, su due gocce replicate (100 µl per goccia), andando a realizzare 6 distinti conteggi per ogni Eppendorf (Figura 7). La concentrazione è stata poi espressa come numero di conidi per ml di pioggia misurata dalla stazione meteorologica.

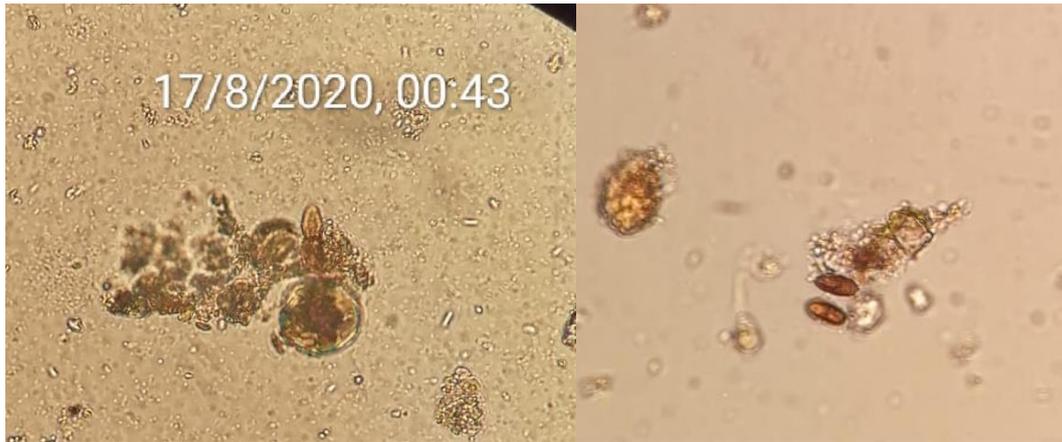


Figura 14: Conidi di *V. oleaginea* osservati al microscopio durante il conteggio in camera Bürker. I conidi si presentano a maturità bicellulari, tendenzialmente piriformi, di colore bruno chiaro 15-30 x 10-15 micron.

7.2.3 Sviluppo dell'equazione del tasso di sporulazione

Lo sviluppo della nuova equazione di sporulazione e la concettualizzazione del sub-modello sono stati realizzati dalla Dott.ssa Elisa Gonzales di Horta srl, supportata dalla mia collaborazione attiva.

Utilizzando l'analisi di sistema (Leffelaar & Ferrari, 1989; Rossi et al., 2010), le informazioni provenienti dalla ricerca bibliografica sono state utilizzate per concettualizzare il modello.

Più dettagliatamente, i dati reperiti attraverso la ricerca bibliografica sono serviti per lo sviluppo di un'equazione matematica all'interno della quale i fattori esterni, come dati metereologici, rappresentano le variabili indipendenti, mentre quelle dipendenti sono rappresentate dalle variabili del sistema stesso; il modello risultante può essere utilizzato per descrivere il sistema sia qualitativamente che dinamicamente. I dati sul patogeno e sulla malattia sono stati ottenuti direttamente dal testo, dalle tabelle e dalle figure degli articoli selezionati; per ottenere dati precisi dai grafici è stato utilizzato Graph Grabber v2.0.4 (<https://www.quintessa.org/software/downloads-and-demos/graph-grabber-2.0.2>). I dati sono stati poi adattati con equazioni matematiche appropriate, selezionate in base alla forma dei dati e al Criterio di Informazione di Akaike (AIC): sono stati poi selezionati i modelli che hanno fornito i valori AIC più bassi per ciascun esperimento (Akaike, 1974; Wolfinger, 1996; Burnham & Anderson, 2002; Angilletta, 2006). I parametri delle equazioni sono stati stimati utilizzando la procedura di regressione non lineare di SPSS (versione 26; IBM SPSS Statistics, IBM Corp., USA), che minimizza le somme dei quadrati residui utilizzando l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (Vandaele, 1983).

7.2.4 Analisi Statistiche

La presenza e la quantificazione dei conidi ottenuti dai collettori di pioggia e l'incidenza della malattia riscontrata sulle piante trappola sono stati confrontati con i dati predetti dalla funzione di sporulazione sviluppata. È stato pertanto applicata la statistica Bayesiana per valutare la probabilità posteriore di prevedere l'evento di sporulazione, come descritto da Madden et al. (2006).

Sono state preparate tabelle di contingenza (2×2) con le seguenti celle: i) la proporzione vera positiva (TPP o sensibilità), ovvero il numero di periodi in cui sono stati raccolti campioni che presentavano conidi e contestualmente il modello ha predetto la sporulazione fratto il numero totale di campioni ottenuti dai collettori captaspore; ii) la proporzione falsa negativa (FNP), ovvero la proporzione di periodi in cui sono stati raccolti campioni che presentavano conidi, ma il modello non ha predetto la sporulazione, fratto il numero totale di campioni ottenuti; iii) la proporzione di falsi positivi (FPP), ovvero la proporzione di periodi in cui non sono stati raccolti conidi, ma il modello ha predetto la sporulazione, fratto il numero totale di campioni ottenuti; iv) e la proporzione di veri negativi (TNP o specificità), ovvero la proporzione di periodi in cui non sono stati raccolti conidi e il modello non ha predetto la sporulazione, fratto il numero totale di campioni ottenuti.

La presenza della malattia riscontrata sulle triplette di piante trappola e quantificata in incidenza e gravità fogliare è stata utilizzata come definitiva conferma dell'avvenuta sporulazione e ovviamente anche dell'avvenuta infezione.

7.3 Risultati

7.3.1 Ricerca in letteratura

La ricerca in letteratura ha permesso di ottenere un totale di 32 articoli scientifici d'interesse, oltre a quelli già citati nel terzo capitolo; tra questi, il documento di maggior interesse è risultato essere la Tesi *PhD* di Obanor (Obanor, 2006), nel quale l'autore ha ricercato e studiato gli effetti della temperatura e delle condizioni di umidità continua sulla sporulazione di *V. oleaginea* e sull'espansione delle lesioni. Tale studio ha previsto esperimenti su piante di cv Barnea, che sono state inoculate con conidi dell'agente oggetto di studio. Le piante con lesioni attivamente sporulanti sono state riposte in camere di crescita con diverse combinazioni di temperatura (T ; 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35°C) e umidità relativa (HR ; 100, 70 %).

Obanor, quindi, è andato ad analizzare la sporulazione osservata sulle lesioni della macchia fogliare dell'olivo a 5-25°C°, in diverse combinazioni con l'umidità. La condizione ottimale

riscontrata è di 15°C e 100% di umidità relativa. L'espansione delle lesioni è stata influenzata in modo significativo ($P < 0,001$) dalla temperatura, con il diametro medio delle lesioni più alto registrato per le foglie incubate a 15°C in condizioni di umidità continua e un'espansione molto ridotta delle lesioni a 25°C. L'autore non indaga però cosa avviene in termini di sporulazione e accrescimento delle lesioni, oltre i 25°C.

Viene riscontrato, inoltre, che la sporulazione si verifica solo sulle superfici delle foglie di olivo prive di tricomi. Al termine di ciascun periodo di incubazione, la sporulazione di *V. oleaginea* è stata quantificata come numero di spore prodotte per area di lesione e per pianta.

7.3.2 Sviluppo dell'equazioni del tasso di sporulazione

Dai dati ottenuti dalla ricerca bibliografica si è pertanto proceduto ad individuare una funzione per descrivere il tasso di sporulazione che presentasse come variabile di risposta la temperatura e l'umidità relativa. I parametri delle equazioni sono stati stimati utilizzando la procedura di regressione non lineare di SPSS (ver. 21.0, SPSS Inc. Chicago, USA).

I dati sono stati poi adattati con equazioni matematiche appropriate, selezionate in base alla forma dei dati e al criterio di informazione di Akaike (AIC): sono stati poi selezionati i modelli che hanno fornito i valori AIC più bassi per ciascun esperimento (Wolfinger, 1996; Analytis, 1980; Akaike, 1974; Burnham & Anderson, 2002; Angilletta, 2006).

L'effetto combinato di temperatura e durata dell'umidità sull'infezione fogliare è stato meglio descritto dall'equazione di β -Gompertz (Madden et al., 2007; Caffi et al., 2016) nella forma seguente:

$$Y = a Teq^b \times (1 - Teq)^c \times \exp[d \times \exp(e \times day)] \times HR \quad (1)$$

in cui: Y è il tasso di sporulazione fogliare; a , b , c , d ed e sono i parametri dell'equazione; day è la durata della umidità relativa atmosferica; Teq è un equivalente della temperatura calcolato come $Teq = (T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})$, in cui T è il regime di temperatura e T_{min} e T_{max} sono le temperature minima e massima (5 e 25°C, rispettivamente); HR sarà pari: a 0,701 con umidità relativa compresa tra 80-100%, a 0,0505 con umidità inferiore all'80%. Le stime dei parametri e dei rispettivi errori standard (ES) sono state le seguenti: $a = 19,52 (\pm 0,55)$, $b = 1,86 (\pm 0,17)$, $c = 2,39 (\pm 0,21)$, $d = -5,32 (\pm 0,13)$ ed $e = -0,31 (\pm 0,05)$, statisticamente significativa ($Pr > |t|$) con $R^2 = 0,972$ e $R^2_{adj} = 0,970$.

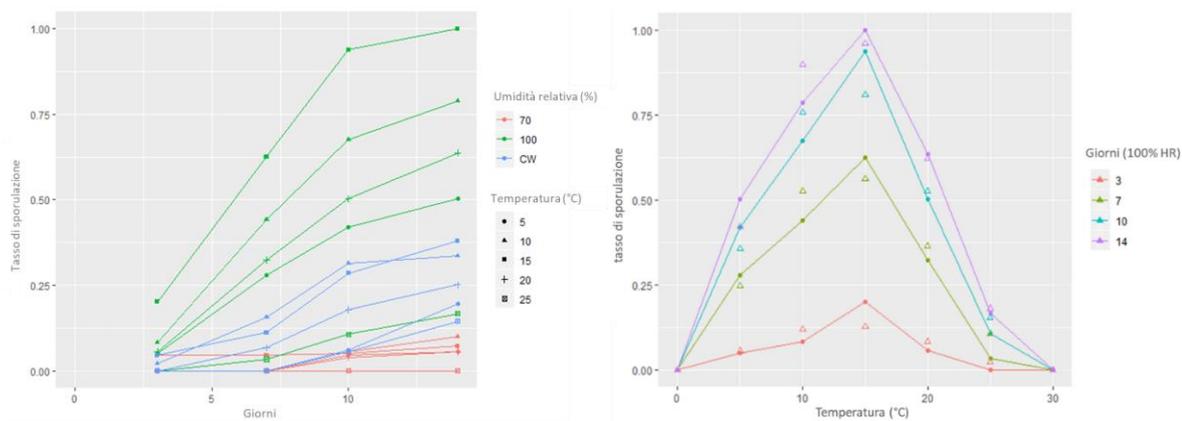


Figura 15 Relazione tra temperatura e umidità relativa e tasso di sporulazione della *V. oleaginea* sull'olivo

Il modello assume che i conidi vengono prodotti all'interno delle lesioni secondo il tasso di sporulazione (*CSPOR*), che dipende dalla temperatura (*T*) e dalla Umidità Relativa (*HR*).

Il modello inizia un periodo di sporulazione, ogni volta che si verifica un periodo di un'ora di umidità e una temperatura compresa tra 0 e 25°C.

7.3.3 Monitoraggio e dinamica della malattia

Sono stati svolti 33 campionamenti in totale a partire dal 25/03/2020 fino al 4/12/2020, utilizzando contemporaneamente sia collettori captaspore che piante trappola; Quattro campioni di captaspore, posizionati i giorni 15 aprile, 16 ottobre, 30 novembre e 4 dicembre non sono stati analizzati a causa delle condizioni metereologiche che hanno determinato il danneggiamento del captaspore stesso. In totale sono stati quindi analizzati 29 campioni, per ciascuno di essi sono state eseguite 18 letture al microscopio con lo scopo di quantificare la concentrazione conidica in rapporto ai ml di pioggia (Tabella 1).

Le piante spia sono state monitorate in ogni caso, anche quando la lettura dei campioni non è stata possibile a seguito del danneggiamento del captaspore (Tabella 2).

I conidi di *V. oleaginea* sono stati riscontrati nei raccoglitori posti sotto la chioma degli alberi durante tutti i 29 periodi di campionamento; tuttavia, le concentrazioni di conidi dei diversi campioni sono risultate molto variabili.

Il primo campionamento è avvenuto dopo un periodo piovoso importante in cui si sono registrati 45,4 mm di pioggia caduta nell'arco di 3 giorni, dal 25/03 al 27/03, corrispondenti alla fase fenologica di apertura delle gemme a fiore. Durante questo primo periodo di raccolta la temperatura e l'umidità relative medie registrate sono state di 7,2 °C e del 92% rispettivamente e la concentrazione conidica misurata in questo primo rilievo è stata pari a 377,7 conidi/ml di pioggia.

Il numero di conidi osservati si è mantenuto basso anche a seguito dell'evento piovoso successivo, di minore importanza e in cui sono caduti 1,8 mm di pioggia, verificatosi in data 28/03, con temperatura di 10,7°C e umidità relativa pari all'85%, e dove è stata osservata una concentrazione di 755,9 conidi/ml di pioggia caduta.

N° campione	Data posizionamento	Data pioggia	Data recupero	Pioggia (mm)	Concentrazione conidica (n°/ml)	Concentrazione conidica relativa
1	24/03/2020	25/03/2020	27/03/2020	45,4	377,9	0,001
2	27/03/2020	28/03/2020	30/03/2020	1,8	755,9	0,003
3	30/03/2020	31/03/2020	01/04/2020	6,2	9259,3	0,035
4	01/04/2020	14/04/2020	15/04/2020	0,2	11715,8	0,044
5	15/04/2020	19/04/2020	20/04/2020	15,4	-	-
6	20/04/2020	20/04/2020	24/04/2020	38,6	133031,0	0,502
7	24/04/2020	19/05/2020	21/05/2020	28,6	74452,0	0,281
8	21/05/2020	30/05/2020	01/06/2020	28,4	82341,3	0,311
9	01/06/2020	03/06/2020	04/06/2020	15,6	47808,0	0,180
10	04/06/2020	05/06/2020	08/06/2020	3,4	26785,7	0,101
11	08/06/2020	15/06/2020	17/06/2020	49,0	53240,7	0,201
12	17/06/2020	04/07/2020	06/07/2020	3,6	10204,1	0,039
13	06/07/2020	15/07/2020	16/07/2020	18,4	35926,9	0,136
14	16/07/2020	17/07/2020	20/07/2020	17,0	26833,0	0,101
15	20/07/2020	05/08/2020	10/08/2020	65,0	59334,8	0,224
16	10/08/2020	18/08/2020	18/08/2020	0,4	32903,4	0,124
17	18/08/2020	24/08/2020	25/08/2020	18,0	4062,7	0,015
18	25/08/2020	21/09/2020	22/09/2020	39,2	38737,7	0,146
19	22/09/2020	23/09/2020	23/09/2020	4,0	189,0	0,001
20	23/09/2020	24/09/2020	24/09/2020	0,0	6046,9	0,023
21	24/09/2020	25/09/2020	28/09/2020	12,8	11904,8	0,045
22	28/09/2020	07/10/2020	08/10/2020	6,2	15306,1	0,058
23	08/10/2020	12/10/2020	13/10/2020	8,4	5857,9	0,022
24	13/10/2020	14/10/2020	14/10/2020	0,0	6424,8	0,024
25	14/10/2020	15/10/2020	16/10/2020	10,4	189,0	0,001
26	16/10/2020	17/10/2020	19/10/2020	2,6	-	-
27	19/10/2020	24/10/2020	26/10/2020	4,6	7180,7	0,027
28	26/10/2020	27/10/2020	29/10/2020	12,6	34958,4	0,132
29	29/10/2020	16/11/2020	18/11/2020	36,2	220899,5	0,834
30	18/11/2020	20/11/2020	23/11/2020	66,8	264928,2	1,000
31	23/11/2020	27/11/2020	30/11/2020	15,0	33635,7	0,127
32	30/11/2020	03/12/2020	04/12/2020	16,6	-	-
33	04/12/2020	06/12/2020	07/12/2020	25,0	-	-

Tabella 1: tabella riassuntiva delle date di posizionamento e recupero di ciascun set di piante trappola e di collettori di pioggia, cadenzate sulla base delle precipitazioni, la cui intensità è riportata nella quinta colonna. Nelle ultime due colonne sono riportati la concentrazione conidica misurata per ciascun ml di pioggia caduto e la concentrazione relativa dei conidi nel corso della stagione di monitoraggio.

N° tripletta di piante trappola	Data pioggia	BBCH piante trappola	Data primo rilievo malattia	Data comparsa sintomi	Giorni di Incubazione Ipotizzabili Δ (H-A)	Data ultimo rilievo malattia	Incidenza media
1	25/03/2020	52	06/04/2020	16/04/2020	22,00	28/12/2020	1,3
2	28/03/2020	52	09/04/2020	09/04/2020	12,00	28/12/2020	7,4
3	31/03/2020	52	14/04/2020	14/04/2020	14,00	28/12/2020	0,6
4	14/04/2020	52	27/04/2020	27/04/2020	13,00	28/12/2020	4,3
5	19/04/2020	53	30/04/2020	13/08/2020	116,00	28/12/2020	0,3
6	20/04/2020	53	04/05/2020	22/06/2020	63,00	14/01/2021	1,1
7	19/05/2020	54	01/06/2020	15/06/2020	27,00	22/01/2021	0,8
8	30/05/2020	70	11/06/2020	18/06/2020	19,00	01/04/2021	1,7
9	03/06/2020	71	15/06/2020	22/06/2020	19,00	01/04/2021	2,1
10	05/06/2020	71	18/06/2020	29/06/2020	24,00	01/04/2021	2,1
11	15/06/2020	72	29/06/2020	13/08/2020	59,00	01/04/2021	0,5
12	04/07/2020	72	16/07/2020	30/07/2020	26,00	01/04/2021	0,8
13	15/07/2020	74	27/07/2020	13/08/2020	29,00	01/04/2021	0,0
14	17/07/2020	75	30/07/2020	13/08/2020	27,00	01/04/2021	0,8
15	05/08/2020	75	20/08/2020	01/10/2020	57,00	01/04/2021	2,9
16	18/08/2020	75	28/08/2020	08/10/2020	51,00	01/04/2021	1,4
17	24/08/2020	75	07/09/2020	08/10/2020	45,00	01/04/2021	1,4
18	21/09/2020	76	05/10/2020	08/10/2020	17,00	01/04/2021	4,0
19	23/09/2020	77	05/10/2020	12/10/2020	19,00	01/04/2021	0,2
20	24/09/2020	77	05/10/2020	12/10/2020	18,00	01/04/2021	1,2
21	25/09/2020	78	15/10/2020	03/11/2020	39,00	01/04/2021	1,3
22	07/10/2020	78	19/10/2020	03/11/2020	27,00	01/04/2021	0,9
23	12/10/2020	80	27/10/2020	05/11/2020	24,00	01/04/2021	0,5
24	14/10/2020	81	27/10/2020	29/10/2020	15,00	01/04/2021	0,5
25	15/10/2020	81	29/10/2020	05/11/2020	21,00	19/04/2021	3,0
26	17/10/2020	81	29/10/2020	05/11/2020	19,00	19/04/2021	2,0
27	24/10/2020	81	05/11/2020	12/11/2020	19,00	19/04/2021	1,7
28	27/10/2020	82	12/11/2020	19/11/2020	23,00	19/04/2021	0,3
29	16/11/2020	83	26/11/2020	11/01/2021	56,00	19/04/2021	0,1
30	20/11/2020	87	14/12/2020	14/12/2020	24,00	19/04/2021	0,9
31	27/11/2020	89	14/12/2020	28/12/2020	31,00	19/04/2021	0,2
32	03/12/2020	89	17/12/2020	11/01/2021	39,00	15/04/2021	0,6
33	06/12/2020	89	28/12/2020	-	-	19/04/2021	-

Tabella 2: tabella riassuntiva dei monitoraggi malattia svolti sulle piante trappola. Le date di posizionamento e recupero di ciascuna tripletta sono riportate in tabella 1. La fenologia, in scala BBCH, è riferita al giorno del recupero dopo l'esposizione all'evento piovoso. I giorni di incubazione ipotizzati sono ottenuti come differenza tra la data di comparsa sintomi e la data di esposizione all'esposizione alla pioggia infettante. Nell'ultima colonna è riportata l'incidenza media di malattia misurata nel corso della stagione di monitoraggio.

A partire dalla data del terzo campionamento, avvenuto il 30/03 la concentrazione di conidi osservati all'interno dei campioni è aumentata rapidamente fino a 9259,3 per ogni ml di pioggia mantenendo poi una tendenza all'aumento, in corrispondenza con l'aumento delle temperature stagionali (Tabella 1), fino a raggiungere il primo picco di sporulazione in data 20/04. In tale data la concentrazione di conidi osservati è stata di 133.031 conidi/ml di pioggia. Nel periodo precedente a questo primo picco primaverile di produzione di inoculo, l'umidità relativa si è mantenuta mediamente intorno al 64%, tuttavia, nella data del picco e in corrispondenza del periodo piovoso compreso tra il 20/4 e il 23/4, tale valore ha raggiunto il 96%, a dimostrazione del ruolo che sia temperatura, che umidità relativa hanno sul processo di sporulazione

Nei campionamenti svolti durante il periodo successivo e durante i mesi estivi, la concentrazione ha mostrato una graduale decrescita, fino a raggiungere in data 22/09 e in data 14/10 la concentrazione di 189,0 conidi/ml di pioggia, i valori minimi registrati nel corso della stagione di monitoraggio.

A partire dal ventiseiesimo campionamento, avvenuto nella terza decade di ottobre, la concentrazione di conidi osservata è aumentata nuovamente fino a raggiungere il secondo picco di concentrazione di 264.926,2 conidi/ml, corrispondente al massimo valore stagionale osservato, e registrato in data 20/11 in corrispondenza del campionamento numero 30.

A partire già dal rilievo successivo, avvenuto a seguito dell'evento piovoso del 27/11, è stata osservata una riduzione drastica della sporulazione con un calo dell'87% nella produzione di conidi (33.635 conidi/ ml di pioggia).

È risultato chiaro come vi sia una relazione tra il verificarsi dei picchi di sporulazione e i due periodi più umidi dell'anno: nei giorni tra il 20 e il 24 aprile, al picco primaverile, i valori medi giornalieri di temperatura e umidità relativa registrati sono stati di 13,9°C e 91% rispettivamente; allo stesso modo nei giorni di riferimento per il picco autunnale, corrispondente alle giornate piovose tra il 20 e il 23 novembre, la temperatura media giornaliera registrata è stata di 9,1 °C e l'umidità relativa il 92%.

A conferma dell'importanza del ruolo dell'umidità relativa nel processo di sporulazione vi è anche il fatto che, in corrispondenza delle date dove è stata osservata la concentrazione minima di conidi, sono state registrate umidità relative e temperature giornaliere medie del 71% e di 8,6° C in marzo, 74% e 21,4°C in settembre e 75% e 14,9°C in ottobre.

Il fatto che in ciascuno dei campioni raccolti, indipendentemente dal mese considerato, siano stati trovati dei conidi dimostra il fatto che in campo vi è sempre disponibilità di inoculo, che viene rilasciato e disperso in ogni evento piovoso.

In merito all'incidenza della malattia osservata sulle piante spia in tutti i mesi sono avvenute delle infezioni che hanno determinato un livello di incidenza maggiore dell'1%, ad eccezione dei mesi di novembre e dicembre, in cui l'incidenza media si è sempre mantenuta al di sotto di tale valore. L'incidenza media relativa all'intero periodo della prova è stata del 1,4%.

È stata raggiunta una media mensile di incidenza maggiore nei mesi di marzo e una frequenza maggiore di piante sintomatiche nel mese compreso tra il 24 settembre e il 24 ottobre; tali periodi corrispondono con il periodo di crescita delle nuove foglie, che si verifica in primavera ed autunno, e che determina un aumento della suscettibilità delle piante nei confronti del patogeno. Ciò conferma quanto riportato da Obanor (2006).

In tutte le triplette di piante è stata osservata malattia ad eccezione dell'ultima, in cui non si sono riscontrati sintomi.

Considerando invece l'andamento a livello di singole triplette, il massimo livello di incidenza è stato raggiunto dalla seconda tripletta. Tale tripletta, è stata esposta ad un evento piovoso di 2 mm il 28 marzo 2020, data in cui si trovava alla fase fenologica di apertura delle gemme (BBCH 52). I primi sintomi sono stati osservati pochi giorni dopo, in data 9 aprile. Nel corso dell'osservazione i sintomi di occhio di pavone su questa tripletta hanno raggiunto un livello medio di incidenza del 7,4%, e in data 20/07/2020 un valore massimo dell'11,1%, valore più alto registrato nel corso dell'intera prova. (Figura 9a).

Nella tripletta numero 9, esposta il 3 giugno, in corrispondenza della fase fenologica di drupe al 10% della dimensione finale (BBCH 72), a un evento piovoso di 19 mm, sono stati raggiunti livelli di incidenza medi del 2,1% con un massimo del 5,1% osservato in data 29 giugno. In questa tripletta i primi sintomi sono stati osservati in data 15 giugno (Figura 9b).

Infine, nel gruppo di piante numero 15, il livello medio è stato del 2,9% con un massimo del 7%. In tale tripletta, esposta ad un evento piovoso di 30 mm in data 5 agosto, a BBCH 75, non sono stati osservati sintomi fino al 1° ottobre 2020 (Figura 9c)

In generale, come è possibile osservare dai grafici in figura 9, l'andamento dell'incidenza osservata nel tempo sulle foglie di olivo delle piante trappola si è mostrato incostante tra le diverse osservazioni, ciò potrebbe essere dovuto alla caduta delle foglie in seguito all'infezione determinata da *V. oleaginea*. Tale andamento potrebbe anche essere determinato dalla scalarità nella manifestazione nei sintomi, dimostrata anche dalla differenza nei tempi di incubazione tra le diverse triplette di piante. Essi, infatti, variano da un minimo di 12 giorni, osservati nella seconda tripletta, ben inferiore rispetto ai tempi di incubazione riportati in bibliografia, fino a un massimo di 116 giorni nella quinta tripletta, in cui i sintomi sono comparsi in data 13 agosto e a seguito di un'avvenuta esposizione alla pioggia in data 20 aprile.

Tuttavia, è importante ricordare che l'incubazione è avvenuta in ambiente di serra, e quindi non sottoposto alle normali condizioni di campo che avrebbero probabilmente determinato una distribuzione diversa dei sintomi nel corso dell'anno.

La gravità della malattia si è mantenuta a livelli non significativi (< 1%) per tutta la durata della prova.

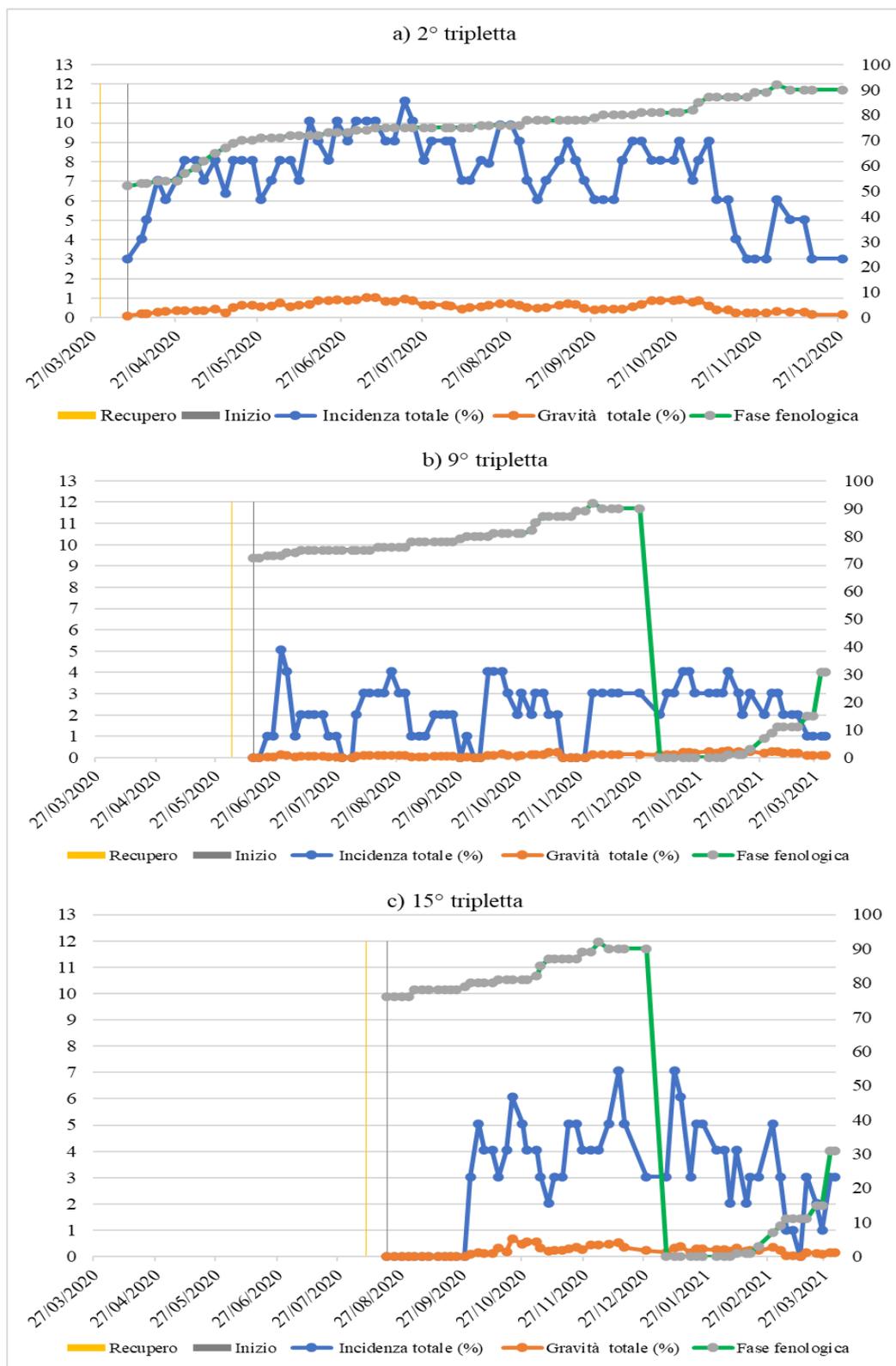


Figura 16 Grafici riportanti l'andamento dell'incidenza (linea azzurra) e della gravità fogliare (linea arancione) riscontrate sulla 2° tripletta (a) (esposta in pieno campo dal 27 marzo al 30 marzo), 9° tripletta (b) (esposta in pieno campo dal 1° giugno al 4 giugno) e sulla 15° tripletta (c) (esposta in pieno campo dal 20 luglio al 10 agosto). La linea verticale gialla indica la data in cui le triplette spia sono state recuperate dal pieno campo per essere collocate in ambiente protetto, al riparo da nuovi eventi piovosi.

7.3.4 Validazione dell'equazione di sporulazione

Per la validazione della nuova funzione di sporulazione sono state confrontate le attività di monitoraggio realizzate nel 2020, nell'oliveto sperimentale, e le simulazioni predette, sulla base dei dati meteorologici registrati dalla stazione nell'anno d'interesse.

Nei mesi interessati dalla prova sperimentale sono caduti complessivamente 627,4 mm di pioggia con una temperatura media annua di 16,1 °C (Figura 10)

La primavera è stata caratterizzata da eventi piovosi uniformemente distribuiti fino alla fine di maggio, con temperature medie di 13,8°C; in questi mesi l'umidità relativa media è stata del 70% con il mese più umido marzo, caratterizzato da un'umidità media relativa del 79,8% e 10,5 ore in media di bagnatura fogliare. L'estate, al contrario è stata caratterizzata da eventi piovosi occasionali, ma di maggior importanza; il periodo piovoso di maggiore rilevanza è stato registrato tra il 5 e il 7 di agosto con 65 mm di pioggia caduti. Agosto è stato anche il mese più caldo con una temperatura media di 27,3 °C.

Rispetto al totale annuo di precipitazioni, 260,4 mm sono caduti nel periodo autunnale, compreso tra la metà di settembre e l'inizio di dicembre. In tale periodo l'umidità relativa e le temperature medie sono state rispettivamente dell'81,9% di 13°C, con novembre mese più umido con una media di umidità relativa dell'87,6%. In tale mese, di conseguenza, è stata registrata anche la massima durata media di bagnatura fogliare, assestata a 12,7 ore.

Nonostante i due periodi più umidi siano stati in primavera ed autunno, la nuova funzione ha predetto infezioni per tutto il corso della stagione, anche in estate, con temperature e umidità relativa meno predisponenti per il processo infettivo. La maggior parte delle infezioni predette, tuttavia, si è concentrata nel periodo primaverile e, soprattutto, autunnale.

Le infezioni predette da fine marzo fino ad inizio dicembre sono state un totale di 29, confermate dalla comparsa dei sintomi sulle piante trappola (Figura 10a) e dalla presenza dell'incidenza fogliare riscontrate dalle piatte trappola (Tabella 2), fatta eccezione per la 13° tripletta.

La vecchia funzione di sporulazione, come evidenziato chiaramente in figura 10b, ha mancato di prevedere tutte le infezioni verificatesi durante il periodo estivo e la maggior parte delle infezioni verificatesi durante il periodo autunnale. In tale periodo si sono verificate le condizioni ottimali sia di temperatura che di umidità per la sporulazione (umidità relativa media 81,9%, temperatura media 13°C e 9,4 ore in media di bagnatura fogliare), in concomitanza con la ripresa della crescita dei germogli, il che ha determinato il verificarsi di un numero maggiore di infezioni anche a causa della maggiore suscettibilità dell'ospite.

Inoltre, sulla base di quanto emerso dall'analisi dei risultati della prova con i collettori di pioggia, la concentrazione conidica in tale periodo ha raggiunto il suo picco annuale massimo, rendendo le condizioni particolarmente predisponenti anche sotto il punto di vista della quantità di inoculo disponibile per l'infezione.

La validazione del modello è stata eseguita attraverso la tabella di contingenza andando a confrontare le sporulazioni predette dalla nuova funzione (1) con i campioni di conidi raccolti dal collettore captaspore e dalle riprove pervenute dall'incidenza rilevate sulle rispettive piante esca.

		Nuova funzione del tasso di sporulazione		
		Dati Predetti		Totali
Dati Osservati	Yes (O+)	Yes (P+)	No (P-)	
		29 (TPP = 1) *	0 (FNP = 0)	29
		No (O-)	0 (FPP = 0)	0 (TNP = 0) **
	Totali	29	0	29

Tabella 3: tabella relativa al confronto tra gli output predetti dalla nuova funzione del tasso di sporulazione di *V. oleaginea* con i dati osservati di comparsa dei sintomi sulle piante campione. Il 100% delle infezioni predette è stata confermata dai sintomi osservati (TPP), non sono stati osservati né falsi positivi, né falsi negativi.

Come si può evincere dalle tabelle 3, la funzione (1) riporta un TPP pari ad 1. La funzione (1) sembra altresì confermare l'assenza di eventi di sporulazione durante i periodi di esposizione dei collettori (TNP) (Tabella 4).

Non sono stati riscontrati né falsi negativi (FNP), né falsi positivi (FPP) relativamente alla nuova funzione (1). Non si è resa necessaria l'analisi Bayesiana in quanto non si sono ottenuti FNP né FPP.

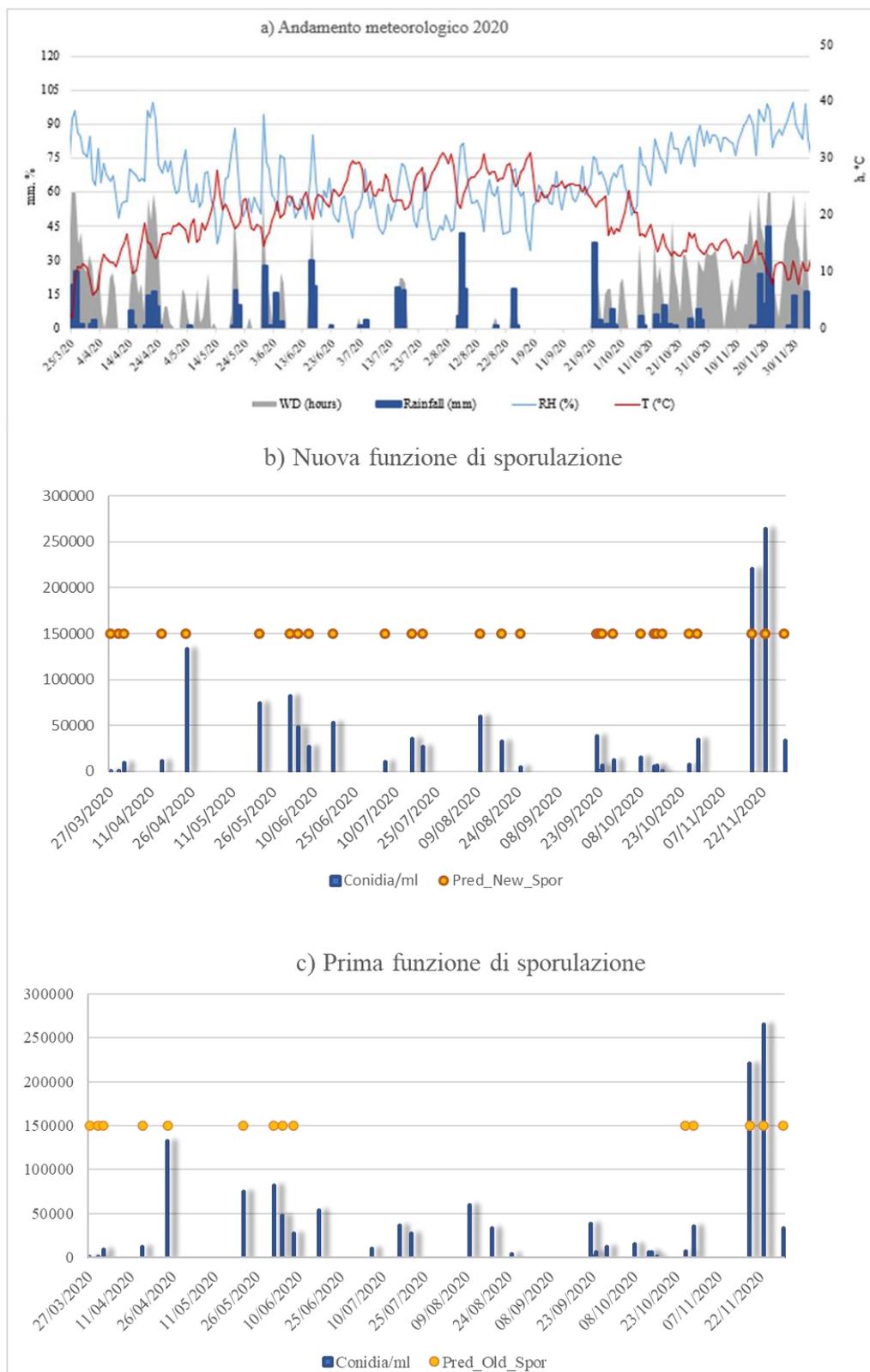


Figura 17 Tabelle riassuntive dell'andamento meteorologico nel corso della stagione di sperimentazione dell'anno 2020 e rispettive infezioni predette dalla nuova funzione di sporulazione (a) e dalla vecchia funzione (b). I cerchi gialli rappresentano l'infezione predetta mentre gli istogrammi blu rappresentano la concentrazione conidica misurata per ogni ml di pioggia caduto a partire dai campionamenti effettuati con il capta spore.

7.4 Discussione e conclusioni

La sporulazione della *V. oleaginea* nell'oliveto è stata studiata utilizzando collettori captaspore e piante esca. I risultati di questo studio hanno mostrato chiaramente che la temperatura e l'umidità relativa sono importanti fattori ambientali che influenzano la sporulazione di *V. oleaginea* su foglie di olivo infette. I risultati di questo studio, condotti nel bacino del Mediterraneo e più precisamente in una delle aree maggiormente vocate all'olivicoltura d'Italia, sono coerenti con le osservazioni descritte da Obanor, 2006, infatti, la sporulazione è stata favorita da un'elevata umidità relativa, temperature più fresche (10-20°C), presentando però sporulazioni predette e osservate anche durante il periodo estivo, seppur in maniera minore.

Nel complesso, il modello ha spiegato gran parte della variazione nella capacità di sporulazione delle lesioni di *V. oleaginea*, anche se saranno necessari più anni di sperimentazione e analisi statiche più approfondite, prima che possa essere utilizzato a fini predittivi nell'intervallo di temperatura e alle varie condizioni di umidità testate.

Dai risultati di questo studio, sono stati rilevati e validati i requisiti ambientali fondamentali per la sporulazione di *V. oleaginea*, ma sono necessarie ulteriori ricerche per indagare l'effetto di altri fattori come la luce, il vento, la cultivar, la temperatura fluttuante e il periodo umido interrotto sulla produzione di conidi di *V. oleaginea*.

L'uso di modelli predittivi della malattia per una protezione sostenibile delle colture consente agli agricoltori di agire al momento giusto e in modo più efficiente, ottimizzando i metodi di gestione delle colture al fine di ridurre le applicazioni di pesticidi e quindi di minimizzare gli effetti sull'ambiente. Questo porta a ridurre i residui di pesticidi sugli alimenti e a diminuire i costi di produzione. Inoltre, questa tesi sarà utile ai ricercatori per migliorare la comprensione del ciclo di vita dei patogeni e delle relazioni tra l'ospite, il patogeno e l'ambiente.

7.5 Bibliografia

- Akaike, H. (1974). A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Alfei, B., Pannelli, G., & Ricci, A. (2016). *Olivicoltura: Coltivazione, olio e territorio*. Edagricole.
- Amponsah, N. T., Jones, E. E., Ridgway, H. J., & Jaspers, M. V. (2009). Rainwater dispersal of *Botryosphaeria* conidia from infected grapevines. *New Zealand Plant Protection*, 62(April), 228–233. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2009.62.4824>

- Analytis, S. (1980). Obtaining of sub-models for modeling the entire life cycle of a pathogen. *Zeitschrift Fur Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz*, 87(7), 371–382.
- Angilletta, M. J. (2006). Estimating and comparing thermal performance curves. *Journal of Thermal Biology*, 31(7), 541–545. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.06.002>
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). Model Selection and Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. In *The Journal of Wildlife Management* (2nd ed., Vol. 65, Issue 3). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.2307/3803117>
- Caffi, T., Legler, S. E., González-Domínguez, E., & Rossi, V. (2016). Effect of temperature and wetness duration on infection by *Plasmopara viticola* and on post-inoculation efficacy of copper. *European Journal of Plant Pathology*, 144(4), 737–750. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0802-9>
- Carisse, O., Rolland, D., Talbot, B., & Savary, S. (2007). Heterogeneity of the aerial concentration and deposition of ascospores of *Venturia inaequalis* within a tree canopy during the rain. *European Journal of Plant Pathology*, 117(1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s10658-006-9069-5>
- Castellani, E. (1952). Osservazioni e ricerche sull'occhio di pavone in Sardegna. *Olearia*, 6, 154–161.
- Ferrari, M., Menta, A., Marcon, E., & Montermini, A. (1999). *Malattie e parassiti delle piante da fiore, ornamentali e forestali*.
- Goidanich, G. (1978). *Manuale di patologia vegetale, Volume III*. Edizione Agricole.
- González-Domínguez, E., Caffi, T., Ciliberti, N., & Rossi, V. (2015). A mechanistic model of botrytis cinerea on grapevines that includes weather, vine growth stage, and the main infection pathways. *PLoS ONE*, 10(10), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140444>
- Graniti, A. (1993). Olive scab: a review. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 23, 377–384.
- Guechi, A., & Girre, L. (1994). Sources of *Cycloconium oleaginum* (Cast.) conidia for infection of olive region of Sétif, Algeria. *Mycopathologia*, 125, 163–171.
- Leffelaar, P. A., & Ferrari, T. J. (1989). Some elements of dynamic simulations. In R. Rabbinge, S. A. Ward, & H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and systems management in crop protection* (pp. 19–45).

- Lopez Villalta, C. (1999). Controllo dei parassiti dell'olivo. *Consiglio Oleicolo Internazionale*, 207.
- Lops, F., Frisullo, S., & Rossi, V. (1993). Studies on the spread of the olive scab pathogen ., *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 23, 385–387.
- Miller, H. N. (1949). Development of the leaf spot fungus in the olive leaf. *Phytopath*, 39(5), 403–410.
- Morettini, A. (1951). Influence of premature defoliation on blossom and fruit production of olive tree. *Annali Della Sperimentazione Agraria*, 5, 547–479.
- Obanor, F. O. (2006). Olive leaf spot: Epidemiology and control. In *PhD Thesis Lincoln University*.
- Ooka, J. J., & Kommnedahl, T. (1977). Wind and rain dispersal of *Fusarium moniliforme* in corn fields. *Phytopathology*, 67, 1023–1026.
- Rhimini, Y., Chliyeh, M., Chahdi, A. O., Touati, J., & Ouazzani, A. (2014). Influence of certain cultural practices and variable climatic factors on the manifestation of *Spilocaea oleagina* , olive peacock spot agent in the northwestern region of Morocco. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 2(5), 1–9.
- Romero, J., Agustí-Brisach, C., Roca, L. F., Moral, J., Gonzalez-Dominguez, E., Rossi, V., & Trapero, A. (2018). A long-term study on the effect of agroclimatic variables on olive scab in Spain. *Crop Protection*, 114(August), 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.08.006>
- Romero, Joaquín, Agustí-Brisach, C., Roca, L. F., Moral, J., Gonzalez-Dominguez, E., Rossi, V., & Trapero, A. (2018). A long-term study on the effect of agroclimatic variables on olive scab in Spain. *Crop Protection*, 114(August), 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.08.006>
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rotem, J. (1988). Quantitative Assessment of Inoculum Production, Dispersal, Deposition, Survival and Infectiousness in Airborne Diseases. In J. Kranz & J. Rotem (Eds.),

Experimental Techniques in Plant Disease Epidemiology (pp. 69–83). Springer-Verlag Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95534-1_6

Sachet, M. R., Danner, M. A., Citadin, I., Pertille, R. H., & Guerrezi, M. T. (2017). Standard area diagram set for olive leaf spot assessment. *Ciência Rural*, 47(6), 6–10. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160923>

Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., & Meier, U. (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Annals of Applied Biology*, 140(2), 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00167.x>

Vandaele, W. (1983). *Applied Time Series and Series and Box - Jenkins Models*. Academic Press.

Wilson, E. E., & Miller, H. N. (1949). Olive leaf spot and its control with fungicides. *Hilgardia*, 19(1), 1–24.

Wolfinger, R. D. (1996). Heterogeneous Variance-Covariance Structures for Repeated Measures Author. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 1(2), 205–230. <https://www.jstor.org/stable/1400366%0AJSTOR>

Zadoks, J. C., & Schein, R. D. (1978). Epidemiology and plant-disease management, the known and the needed. In *Comparative epidemiology: A tool for better disease management* (Issue August 1978).

Scopus (<https://www.scopus.com>)

Web of Science (<https://apps.webofknowledge.com>)

Google Scholar (<https://scholar.google.it>)

Graph Grabber v2.0.4 (<https://www.quintessa.org/software/downloads-and-demos/graph-grabber-2.0.2>),

CAPITOLO 8- REALIZZAZIONE DI UN MODELLO EMPIRICO DELLO SVILUPPO DI *Phylenus spumarius*

8.1 Introduzione

Xylella fastidiosa sottospecie *pauca* ST53 rappresenta una grave minaccia per le coltivazioni olivicole nell'Italia meridionale, a causa del suo coinvolgimento nella Sindrome del Declino Rapido dell'Olivo (Cornara, Saponari, et al., 2017). Per tale ragione il batterio è considerato un patogeno da quarantena nell'Unione europea (CE/29, 2000).

Come descritto dettagliatamente nel terzo capitolo, tra i potenziali insetti vettori di *X. fastidiosa* in Europa e nei paesi del Mediterraneo sono state identificate in modo inequivocabile le sputacchine (Hemiptera: Aphrophoridae) (Bodino et al., 2020) e in particolare, la specie *Philaenus spumarius* L., nota come sputacchina media” (Saponari et al., 2014).

P. spumarius riveste un ruolo epidemiologico fondamentale nella diffusione del patogeno, in quanto molto abbondante, sia sulla vegetazione spontanea sia sull'olivo (Cornara, Saponari, et al., 2017). Per questo motivo, la gestione dell'insetto è cruciale per il controllo della diffusione della *Xylella*, tanto da aver indotto la Commissione Europea a imporre interventi di gestione obbligatoria. (European Parliament, 2016).

A conferma di ciò vi è il fatto che è stata in genere osservata una più rapida progressione della malattia, con incidenze fino al 100%, in oliveti di varietà suscettibili dove contemporaneamente è stata riscontrata, durante la stagione estiva, un'abbondante infestazione di *P. spumarius* con un'alta percentuale (>70%) di adulti positivi a *X. fastidiosa* (Cornara et al., 2017; Cornara, Saponari, et al., 2017). Sebbene l'efficienza della trasmissione di *P. spumarius* non sia particolarmente alta, l'elevato numero di adulti presenti persistentemente per settimane o mesi sulla chioma degli olivi causa ripetute infezioni e spiega la drammatica e rapida progressione della malattia (Saponari et al., 2019; Daugherty & Almeida, 2009).

8.1.1 Ciclo biologico

Philaenus spumarius è un rincote omottero univoltino della famiglia delle *Afroforidae*. L'insetto sverna sotto forma di uovo; in Puglia, è stato osservato che l'ovodeposizione avviene in concomitanza con una diminuzione della temperatura media giornaliera al di sotto di circa

15 °C (Cornara, Bosco, & Fereres, 2018). Le uova vengono ovodeposte in stoppie, erbe, parti morte di piante, residui vegetali, crepe e cortecce di tronchi d'albero o nella lettiera vegetale; esse presentano forma allungata, ovoidale e affusolata, e colore bianco-giallastro con una macchia arancione pigmentata di scuro a un polo. Se l'uovo viene fecondato, la macchia arancione si ingrandisce e si sviluppa una formazione nera simile a un coperchio (Saponari et al., 2019). La schiusura avviene in funzione della temperatura, in quanto affinché le uova superino la diapausa sono necessari lunghi periodi di esposizione a temperature inferiori a 5°C. In Puglia, le prime ninfe vengono osservate intorno alla metà di febbraio. Il periodo di schiusura delle uova è di circa un mese; a causa di questo lungo intervallo, diversi stadi ninfali possono coesistere contemporaneamente in campo (Picciotti et al., 2021). Il periodo ninfale, suddiviso in cinque stadi, può durare da 35 a 100 giorni (Weaver & King, 1954; Yurtsever, 2000). La comparsa delle prime ninfe avviene a partire dalla metà di marzo, con un picco intorno alla metà di aprile. La ninfa del primo stadio è lunga circa 1,35 mm, di colore arancione; con il progredire dello sviluppo, il colore diventa gradualmente giallo-verdastro. Durante gli ultimi due stadi viene prodotta una grande quantità del secreto schiumoso che conferisce all'insetto il caratteristico nome (Yurtsever, 2000)(Figura 1). Le ninfe sono poco mobili e si trovano preferibilmente su piante erbacee o su piante di bassa taglia o stoppie, che offrono all'insetto riparo dal sole diretto e dai venti secchi, permettendo di preservare la schiuma protettiva (Cornara et al., 2018). In Europa, la densità delle ninfe non supera le 1000 ninfe/m² (Zajac & Wilson, 1984).

Al momento dell'ultima muta, la ninfa cessa di produrre la schiuma protettiva, che progressivamente secca, fino all'apparizione dello stadio adulto (Weaver & King, 1954). Gli adulti compaiono da aprile in poi e vivono fino all'autunno (Weaver & King, 1954), anche se possono sopravvivere per tutta la primavera successiva in caso di inverni miti (Saponari et al., 2014). Gli adulti sono lunghi 5,5-6,5 mm, hanno forma ovoidale e un colore che va dal color crema fino al bruno scuro, con un capo angoloso, più largo che lungo (Figura 1). I maschi compaiono prima delle femmine e, nel corso dell'anno, il loro numero diminuisce rispetto a queste ultime (Cornara et al., 2018).

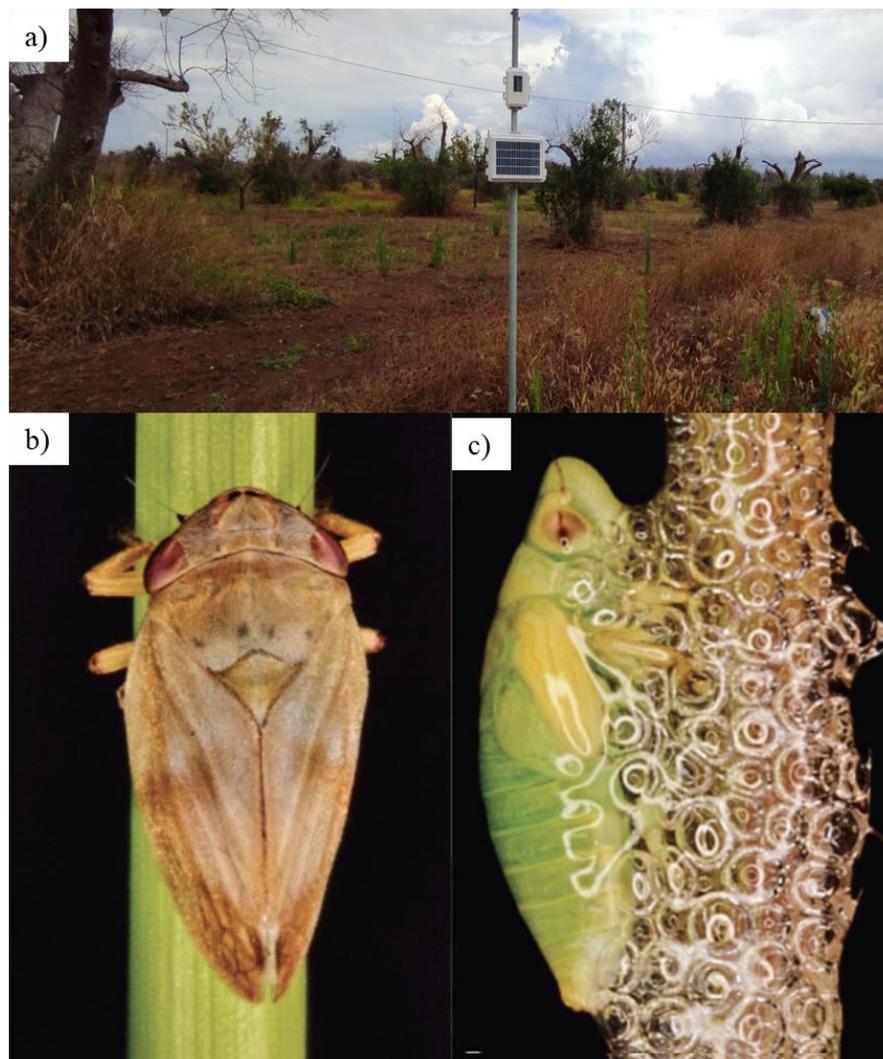


Figura 1: a) Oliveto distrutto dagli attacchi di *Xylella fastidiosa*; b) Adulto di *Philaenus spumarius*; c) Ninfa al quinto stadio di *Philaenus spumarius* circondata dalla caratteristica secrezione spumosa (Da Picciotti et al., 2021).

Gli adulti, a differenza degli stadi giovanili, sono mobili e compiono spostamenti stagionali dalla vegetazione erbacea sotto gli oliveti alle chiome degli olivi e di altri alberi e arbusti sempreverdi o decidui nella tarda primavera e all'inizio dell'estate (Bodino et al., 2017). Quando la copertura erbacea persiste durante l'estate, questo movimento può essere osservato anche durante questa stagione e quindi esso è probabilmente dovuto alla preferenza delle forme adulte di nutrirsi su piante arboree (Vos et al., 2019). Alla fine dell'estate e all'inizio dell'autunno, le femmine adulte tornano alla vegetazione erbacea per l'ovodeposizione (Cornara et al., 2018). La conoscenza del ciclo biologico di *P. spumarius* (Figura 2) è fondamentale nello sviluppo di strategie di controllo mirate, che tengano conto dei fattori che coinvolgono la dinamica e la fluttuazione della popolazione dell'insetto negli oliveti. Ad esempio, la gestione della vegetazione al suolo, ovvero una corretta tempistica di lavorazione del terreno atta ad

interrompere lo sviluppo ninfale e ridurre l'emergenza degli adulti, è un fattore chiave per ridurre le popolazioni di *P. spumarius* e limitare la diffusione del patogeno. Per questo motivo le tempistiche di intervento risultano fondamentali per ottenere una massima gestione degli stadi giovanili, approccio che risulta essere più efficace e sostenibile rispetto al controllo degli adulti, che al contrario richiede diverse applicazioni di insetticidi per tutto il periodo in cui sono presenti all'interno dell'oliveto.

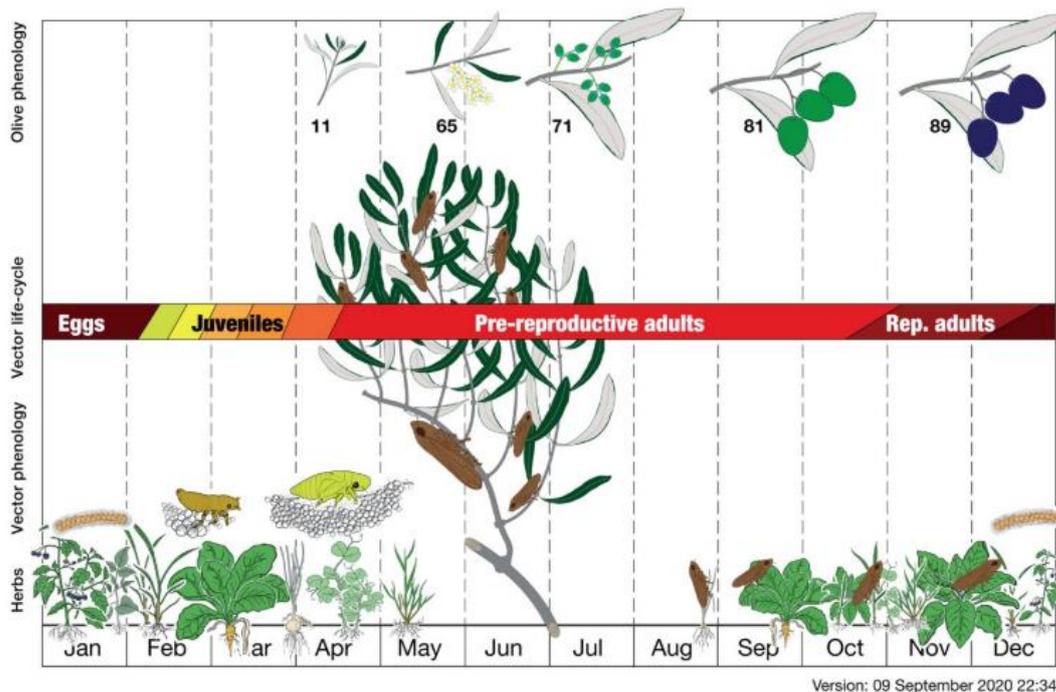


Figura 18: Rappresentazione delle diverse fasi del ciclo biologico di *Philaenus spumarius* e delle piante ospiti sulla quali si svolge. L'insetto sverna sotto forma di uovo in prossimità del suolo e su piante erbacee o sterpaglie. Gli stadi giovanili permangono sulle piante erbacee fino a che, gli adulti, si spostano sulla chioma dell'olivo, o di altre piante ospiti (Da: (Picciotti et al., 2021)).

8.1.2 I modelli previsionali applicati agli insetti

Come spiegato in precedenza, la previsione delle dinamiche di popolazione degli insetti è necessaria per pianificare strategie e azioni di controllo e per questo motivo sono state studiate nel dettaglio le relazioni matematiche tra i fattori che le influenzano, primo tra tutti la temperatura e secondariamente l'umidità relativa, il fotoperiodo, lo stadio e la disponibilità dell'ospite. Tali conoscenze e relazioni matematiche possono essere utilizzate, anche nel caso dell'entomologia, per sviluppare modelli meccanicistici che simulano il comportamento degli insetti sulla base delle conoscenze scientifiche; essi richiedono una conoscenza dettagliata dell'insetto, ma grazie alla loro flessibilità ed accuratezza possono essere applicati in contesti diversi (Sharpe, Curry, DeMichele, & Cole, 1977; Magarey & Isard, 2017).

In riferimento alla modellistica applicata all'entomologia un'altra classificazione distingue due categorie di modelli: fenologici e demografici.

8.1.2.1 *Modelli fenologici*

L'obiettivo principale dei modelli fenologici è quello di prevedere il momento di comparsa di specifici stadi dello sviluppo di un insetto, con lo scopo di guidare nella definizione delle date di campionamento o di intervento fitoiatrico più appropriate. Il clima ha un effetto fondamentale sulla distribuzione e sulla presenza di invertebrati come gli insetti e poiché la temperatura, tra le variabili climatiche, esercita una un'influenza diretta sulla loro fenologia e sulla loro distribuzione, la maggior parte dei modelli che descrivono lo sviluppo degli insetti è guidata dalla temperatura (Akers & Nielsen, 1984; Damos & Savopoulou-Soultani, 2012). Questi modelli, basati principalmente sulle sommatorie termiche (*Degree-Days*), non operano sulla base dei giorni di calendario, ma su una scala di unità di calore e si basano sul fatto che la crescita di un organismo o di un insetto è strettamente legata alla temperatura dell'ambiente in cui si trova (Jones & Brunner, 1993; Hardman, 2012).

L'origine dei modelli matematici di simulazione fenologica risale alla prima metà del '700 ad opera dello scienziato francese René Antoine Ferchault de Réaumur, che sommò le temperature giornaliere misurate a Parigi per simulare i tempi di maturazione della vite (Mipaaf, n.d.) e, in generale, si può dire che il primo sforzo per una descrizione formale della relazione tra temperatura e tasso di sviluppo è stato intrapreso dai botanici, per modellare l'effetto della temperatura sulla crescita e sullo sviluppo delle piante (Yang, Logan, & Coffey, 1995). Tuttavia, procedure simili si sono estese alla maggior parte degli organismi eterotermi, compresi gli insetti (Akers & Nielsen, 1984; Allsop & Butler, 1987; Damos & Savopoulou-Soultani, 2012).

Da quando fu introdotto il concetto di unità di calore, molti metodi di calcolo del tempo termico fisiologico sono stati utilizzati per simulare la fenologia degli organismi eterotermi. La maggior parte di questi modelli si basa sul concetto di "legge delle temperature totali effettive" che parte dal presupposto che tutti gli organismi sono legati ad una costante termica specifica della specie, che corrisponde ad unità di tempo che devono essere accumulate per completare una determinata fase di sviluppo (Wagner, Wu, Sharpe, & Coulson, 1984; Damos & Savopoulou-Soultani, 2011). Tuttavia, la regola della somma delle temperature di cui sopra è valida all'interno dell'intervallo termico specifico, al di sopra e al di sotto del quale lo sviluppo dell'organismo si arresta (Cossu, Delirio, Di Cola, & Gilioli, n.d.). Pertanto, sono stati proposti diversi modelli empirici di regressione lineare e non lineare, compresa la derivazione dei

modelli biofisici, per definire queste temperature critiche di sviluppo. Inoltre, sono state proposte diverse misure statistiche basate sui minimi quadrati ordinari anziché sulla verosimiglianza, per la stima dei parametri e il confronto dei modelli (Damos & Savopoulou-Soultani, 2012).

I modelli fenologici di solito si attivano in corrispondenza di un evento facilmente rilevabile, come il primo volo dell'insetto, e vengono utilizzati per prevedere eventi importanti, ma non facilmente campionabili, come la schiusa delle uova o il picco di volo (Jones & Brunner, 1993). I modelli fenologici più semplici sono quelli che prendono in considerazione solo gli effetti della temperatura sullo sviluppo dei diversi stadi e che si basano sulla sommatoria delle catture stagionali in rapporto ai “gradi giorno” cumulati; tuttavia, nel caso in cui vengano considerati più fattori all'interno del modello, il processo stesso di sviluppo e utilizzo dei modelli fenologici può far progredire la conoscenza delle dinamiche di popolazione degli insetti (Hardman, 2012). Con il tempo sono stati sviluppati modelli matematici sempre più sofisticati, che descrivono a diversi livelli i complessi meccanismi della fisiologia. Numerosi autori hanno sviluppato modelli fenologici di diversa complessità per insetti ad interesse agrario. Tra questi ricordiamo: (Bostanian et al., 2006), per aver sviluppato un modello fenologico per un complesso di cinque specie del genere *Erythroneura* e per la specie, *Empoasca fabae* (Harris), utilizzando i gradi-giorno accumulati dopo il 1° marzo al di sopra di una soglia di 8°C per prevedere l'abbondanza cumulata degli insetti; (Gallardo et al., 2009), che hanno sviluppato un modello fenologico per prevedere l'attività del secondo e terzo periodo di volo della *Lobesia botrana* (Denis & Schiffermüller); (Moravie, Davison, Pasquier, & Charmillot, 2006) per modelli che stimano i tempi di emergenza della tignoletta della vite *L. botrana* e della tignola *Eupoecilia ambiguella* Hübner; Tobin et al. (2001), che hanno sviluppato un modello fenologico completo per prevedere le dinamiche temporali della *Paralobesia* (= *Endopiza*) Clemens, in varie regioni viticole degli Stati Uniti orientali; e, infine, Bressan et al.(2005), che hanno utilizzato i dati di cattura di *Scaphoideus titanus* Ball, vettore della flavescenza dorata, per sviluppare un modello logistico per la predizione della schiusura delle uova e per la predizione della percentuale di popolazione in grado di trasmettere il fitoplasma.

8.1.2.2 Modelli demografici

Mentre i modelli fenologici sono utilizzati per prevedere la comparsa di uno o più stadi vitali di un insetto, i modelli demografici prevedono le densità giornaliere per tutti gli stadi vitali (Getz & Gutierrez, 1982; Baumgärtner, Gutierrez, & Klay, 1988). In questi modelli gli individui sono raggruppati in classi di età fisiologiche e si spostano da una classe all'altra con il progredire

dell'età, dello sviluppo, della fecondità e della mortalità degli individui. Questi processi sono influenzati da fattori abiotici, come le condizioni meteorologiche, e biotici, come la presenza di predatori o la disponibilità di piante ospiti. Dato il livello di informazioni che questi modelli utilizzano, permettono di ottenere informazioni più affidabili rispetto ai modelli fenologici, poiché considerano lo sviluppo, la sopravvivenza e la fecondità piuttosto che solo l'effetto della temperatura sulla fenologia degli insetti. Inoltre, i modelli demografici forniscono una maggiore comprensione delle dinamiche di popolazione degli insetti. Essi possono essere utilizzati sia nella difesa integrata tattica che in quella strategica (Magarey et al., 2002; Rossi, Caffi, & Salinari, 2012). Nell'ambito dell'*IPM* tattica, aiutano a definire i tempi e l'intensità delle azioni di controllo in base alla densità prevista degli insetti nocivi e alla loro struttura di età. D'altra parte, nell'*IPM* strategica, i modelli demografici possono essere utilizzati per prevedere le perdite economiche in base alle condizioni meteorologiche e al loro effetto su parassiti e ospiti. Inoltre, i modelli demografici possono essere utilizzati per valutare l'impatto di diversi nemici naturali, tenendo conto degli effetti meteorologici (Hardman, 2012).

Munns et al. (2007) hanno classificato i modelli demografici in cinque categorie, in base al raggruppamento biologico e spaziale degli individui nella definizione del modello. Secondo tale suddivisione si può fare riferimento a: i) modelli di popolazione non strutturati, ii) modelli biologicamente strutturati, iii) modelli d'individuo, iv) modelli di meta popolazione e v) modelli spazialmente espliciti. I modelli non strutturati, scalari, non presentano alcuna struttura, in quanto la popolazione viene trattata come un'unica entità. Nei modelli biologicamente strutturati, al contrario, la popolazione è divisa in coorti, e gli individui di ogni coorte si comportano in modo identico e i loro tassi demografici sono influenzati in modo uguale dalle variabili ambientali. Le coorti sono strutturate in base a una variabile biologica come lo stadio di sviluppo, la dimensione o l'età. Nei modelli basati sull'individuo, o ad agente, i processi demografici seguono gli individui e le loro proprietà simulati nel tempo. Ogni individuo ha una serie di variabili di stato o di attributi e di comportamenti, comportamenti che possono includere la crescita, la riproduzione, la selezione dell'habitat, il foraggiamento e la dispersione. A differenza dei tradizionali modelli di popolazione a equazione differenziale, descritti in base a parametri imposti dall'alto verso il basso (come il tasso di natalità e il tasso di mortalità), i modelli basati sull'individuo sono modelli dal basso verso l'alto, in cui i fattori di rischio a livello di popolazione derivano dalle interazioni tra individui autonomi ambiente. Un vantaggio dei modelli basati sull'individuo rispetto ai modelli tradizionali è che possono incorporare numerosi meccanismi a livello individuale. Essi vengono utilizzati quando uno o più aspetti

risultano difficili o impossibili da rappresentare nelle equazioni di differenziazione a livello di popolazione (DeAngelis & Grimm, 2014).

Si tratta di modelli meccanici che possono rappresentare molteplici meccanismi degli individui; per sviluppare questi modelli sono quindi necessarie informazioni dettagliate sulla biologia e sull'ecologia degli insetti. I modelli basati sugli individui in ecologia hanno due configurazioni generali: la distribuzione degli stadi derivata dall'equazione differenziale parziale estesa di McKendrick von-Foerster e l'approccio della configurazione degli stadi, che può essere basata su qualsiasi equazione ed è definita simulando il comportamento e l'interazione di molti individui con il loro ambiente (Gilioli & Pasquali, 2007).

I modelli di meta popolazione considerano la distribuzione spaziale della popolazione e possono rappresentare la popolazione come sottogruppi legati dalla migrazione. Infine, i modelli spazialmente espliciti, o modelli di paesaggio, rappresentano le caratteristiche dello spazio insieme ai fattori ambientali che influenzano la popolazione.

Un esempio importante di modello demografico basato sulla fisiologia (*physiologically-based demographic model* o *PBDM*) è quello sviluppato da Gilioli et al. (2016); questo tipo di modelli ha il vantaggio di stimare la percentuale di popolazione dell'insetto in ogni stadio di vita, fornendo così una previsione più accurata e informativa rispetto ai semplici modelli fenologici. Inoltre, i *PBDM* possono considerare gli effetti di fattori biotici e abiotici basati sulla conoscenza scientifica dei processi meccanici degli insetti. Il framework *PBDM* sviluppato da Gilioli et al. (2016) si basa su un modello demografico stocastico generale in grado di rappresentare dinamiche di popolazione strutturate in stadi ed è stato dimostrato che può essere applicato a diverse specie di insetti, come nel caso della previsione della dinamica di popolazione della tignola delle bacche dell'uva *L. botrana* in Veneto (Gilioli, Pasquali, & Marchesini, 2016).

Tuttavia, i *PBDM* sono complessi da sviluppare e richiedono tempo e dati considerevoli sulla biologia degli insetti.

8.2 Obiettivi della ricerca

Anche se gli elementi chiave della lotta all'insetto *P. spumarius* sono definiti a livello legislativo l'esperienza maturata in Italia ha evidenziato la necessità di ricerca, innovazione e servizi avanzati per affrontare in modo consapevole ed esperto l'emergenza fitosanitaria determinata da *X. fastidiosa*. La Regione Puglia e l'Unione Europea investono importanti risorse per raggiungere tali obiettivi ed è pertanto necessario migliorare le strategie di gestione

del vettore sulla base delle informazioni acquisite, con l'applicazione di metodologie avanzate che aiuterebbero notevolmente gli agricoltori a programmare gli interventi e controllare le forme giovanili (Regione Puglia, 2022).

Lo scopo di questo studio è stato quello di colmare le lacune conoscitive sulla fenologia, l'ecologia e la dinamica delle popolazioni di *P. spumarius*, negli oliveti del bacino del Mediterraneo. Più nello specifico le attività di ricerca si sono concentrate su:

- approfondimenti sullo sviluppo dipendente della temperatura, andando ad individuare le soglie termiche dei diversi stadi, attraverso la ricerca delle pubblicazioni scientifiche di riferimento;
- sviluppo di un modello empirico basato sui gradi-giorno (*GDD*), in funzione delle soglie termiche individuate;
- calibrazione del modello *GDD* attraverso i dati raccolti in campo e la definizione delle costanti termiche dell'insetto.

In entomologia applicata, gli approcci empirici sono spesso utilizzati per la costruzione di modelli di sviluppo. In generale, le procedure includono la delimitazione di tutti i fattori che influenzano lo sviluppo fino a quello più limitante, al fine di rivelare la dipendenza empirica della variabile di sviluppo dal fattore limitante. Una funzione che descrive i dati con maggiore accuratezza viene inserita in questa relazione e il suo potere predittivo viene ulteriormente valutato utilizzando un nuovo set di dati.

Attraverso queste preliminari ricerche, in funzione della definizione e validazione delle soglie e delle costanti termiche, sarà possibile in futuro intraprendere un approccio meccanicistico per la realizzazione di un modello di dinamica di popolazione.

Per raggiungere questo obiettivo, sono state recuperate informazioni rilevanti attraverso un'accurata ricerca in letteratura, a cui sono state abbinate delle prove in campo per raccogliere informazioni sui diversi stadi di sviluppo dell'insetto. I siti di studio sono caratterizzati da un'ampia gamma di condizioni nell'ambito del clima mediterraneo. Le diverse condizioni climatiche e agro ecologiche dei siti di campionamento ci hanno permesso di monitorare diverse popolazioni di *P. spumarius* e di altri potenziali vettori di *X. fastidiosa* negli oliveti del bacino mediterraneo e di analizzarne la presenza all'interno del territorio.

8.3 Materiali e metodi

8.3.1 Ricerca in letteratura

Una prima fase della ricerca è stata indirizzata ad un'accurata analisi della letteratura, seguendo le varie pubblicazioni che ci potevano essere di aiuto per recuperare le più complete e approfondite indicazioni su *P. spumarius*, vettore di *X. fastidiosa*.

Detta ricerca, fondamentale per gli studi successivi, oltre a fornire in dettaglio informazioni sulla biologia ed ecologia del vettore, riportate nell'introduzione di questo capitolo, ha permesso approfondimenti sulla modellistica entomologica, concettualmente e formalmente distinta da quella epidemiologica.

La ricerca della letteratura è stata effettuata nelle banche dati bibliografiche digitali *Scopus* (<https://www.scopus.com>), *Web of Science* (<https://apps.webofknowledge.com>) e *Google Scholar* (<https://scholar.google.it>), conclusa il 1° luglio 2021.

Per essere presi in considerazione, gli articoli dovevano soddisfare i seguenti criteri: i) essere scritti in inglese o italiano; ii) contenere dati originali sulla biologia, l'ecologia, la fenologia e la dinamica di popolazione dell'insetto vettore *P. spumarius*; iii) contenere dati originali sull'interazione tra il vettore, la pianta ospite e l'ambiente; iv) essere pubblicati su riviste, atti o in altre forme, compresi rapporti o siti web di autorità/organizzazioni competenti.

Sulla base di questi criteri, sono state formulate *query* specifiche per la ricerca di articoli accademici, recensioni, articoli in stampa e documenti di conferenze nei tre database bibliografici digitali. La ricerca, limitata a titoli, abstract e parole chiave, è stata effettuata combinando le seguenti parole chiave: i) vettore della *Xylella fastidiosa* o vettore della malattia (CoDiRO) o *Philaenus spumarius* o sputacchina dell'olivo o “*meadow spittlebugs*” o “*spittlebugs*”; ii) entomologia o Insecta o Hemiptera; iii) ciclo vitale o struttura degli stadi o fenologia o ecologia dell'insetto o fattori ecologici o temperature di soglia inferiore e superiore per lo sviluppo o accumulo di unità di calore richiesto iv) *population density* o *sampling methods*; v) modello o tasso di sviluppo o previsione o simulazione.

Gli articoli sono stati prima esaminati e selezionati sulla base delle informazioni contenute nel titolo e nell'abstract. Il testo completo di ogni articolo selezionato è stato poi letto e rivisto. Ulteriori articoli sono stati selezionati dai riferimenti dei testi precedentemente individuati, recuperandoli e revisionandoli.

8.3.2 Monitoraggio e caratteristiche dei siti sperimentali

I dati di monitoraggio oggetto di questo studio e descritti nei prossimi paragrafi, sono stati condivisi dal *Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes (CIHEAM)* di Bari, attraverso la rete di tecnici presenti nel territorio pugliese.

I monitoraggi sono stati condotti in 41 siti pugliesi (Sud Italia), durante la stagione 2019 (Figura 3); i siti coprono buona parte dell'areale pugliese e dal punto di vista altitudinale e variano fra gli 8 ed i 436 m sul livello del mare, fornendo una buona rappresentazione del territorio Pugliese. Inoltre, sebbene il *dataset* si riferisca ad un solo anno di monitoraggio, una così ampia distribuzione latitudinale ed altitudinale determina condizioni ambientali di sviluppo diversificate che forniscono una robusta base di calibrazione per le attività modellistiche.



Figura 19 Ubicazione dei 41 oliveti, rappresentati con un cerchio rosso, monitorati per la presenza di sputacchina nelle regioni Puglia nel 2019.

Gli oliveti sono stati selezionati sulla base di una gestione a basso input, ad esempio non sono stati condotti trattamenti con insetticidi e non sono state effettuate lavorazioni del terreno negli oliveti durante il periodo di studio (non influenzando così lo sviluppo degli stadi preimmaginali di sputacchina). All'interno di ogni oliveto è stata rilevata un'area omogenea di 1 ettaro (unità di campionamento primaria - PSU).

I monitoraggi di tutti gli stadi dell'insetto sono stati condotti nel 2019 nelle seguenti 7 date, contestualmente in tutti i 41 siti della prova: 25 marzo; 04 aprile; 12 aprile; 18 aprile; 30 aprile; 09 maggio; 23 maggio.

ID Sito	Località dei siti di monitoraggio	Provincia	Quota Altimetrica (m, s.l.m.)	Coordinate	Numero rilievi condotti nel 2019
1	Acquaviva delle Fonti	BA	275	40,9079584115 N 16,8897772952 E	7
16	Alberobello	BA	426	40,7894147286 N 17,234917993 E	7
11	Castellana Grotte	BA	315	40,8550115724 N 17,2208017655 E	7
12	Castellana Grotte	BA	275	40,8915520546 N 17,1539369946 E	7
2	Corato	BA	88	41,0717594785 N 16,3089812324 E	7
3	Mola di Bari	BA	105	41,0258395899 N 17,0765608648 E	7
19	Monopoli	BA	322	40,8767292476 N 17,2315751691 E	7
20	Monopoli	BA	56	40,9085990812 N 17,3111468828 E	7
17	Monopoli	BA	99	40,9290488666 N 17,2605776636 E	7
18	Noci	BA	436	40,7801676021 N 17,170021393 E	7
14	Noci	BA	380	40,8089016754 N 17,0938478326 E	7
6	Ruvo di Puglia	BA	260	41,1042703988 N 16,4570750107 E	7
5	Sammichele di Bari	BA	310	40,8735167926 N 16,9106032634 E	7
8	Santeramo in Colle	BA	409	40,7809853937 N 16,6943441154 E	7
10	Terlizzi	BA	165	41,1488491481 N 16,5145122453 E	7
39	Carovigno	BR	34	40,7116352935 N 17,7558894919 E	7
27	Cisternino	BR	320	40,7217440757 N 17,4396515937 E	7
28	Fasano	BR	147	40,7975134691 N 17,3934424394 E	7
24	Fasano	BR	8	40,882169006 N 17,3908406231 E	7
37	Francavilla Fontana	BR	125	40,4995996902 N 17,5924235308 E	7
29	Ostuni	BR	232	40,7262198848 N 17,5128489036 E	7
33	Ostuni	BR	42	40,7486095337 N 17,642350471 E	7
9	Andria	BT	179	41,2013401365 N 16,2053142399 E	7
7	Bisceglie	BT	80	41,2139884124 N 16,4530893697 E	7
31	Botrugno	LE	100	40,0593649958 N 18,3220494945 E	7
34	Cutrofiano	LE	80	40,1151809408 N 18,2395786687 E	7
38	Gallipoli	LE	27	40,0169021989 N 18,0567416461 E	7
40	Leverano	LE	50	40,2823725144 N 17,9482902861 E	7
35	Surbo	LE	28	40,4375400763 N 18,1304863213 E	7
4	Castellaneta	TA	75	40,6026136211 N 16,9453083124 E	7
23	Crispiano	TA	244	40,6098006304 N 17,3710755321 E	7

30	Crispiano	TA	270	40,625088632 N 17,1767485987 E	7
41	Crispiano	TA	304	40,6287772505 N 17,2718425246 E	7
32	Manduria	TA	65	40,3304317757 N 17,6930588705 E	7
21	Martina Franca	TA	415	40,7239815262 N 17,2392477898 E	7
26	Martina Franca	TA	418	40,7428599445 N 17,2565278188 E	7
25	Massafra	TA	258	40,6165582854 N 17,1385719872 E	7
13	Palagianò	TA	28	40,5513200995 N 17,0384972047 E	7
15	Palagianò	TA	42	40,5837866366 N 17,0640436634 E	7
36	Sava	TA	92	40,3669350092 N 17,5528814715 E	7
22	Statte	TA	83	40,5463967388 N 17,2425517095 E	7

Tabella 6 Principali informazioni relativi ai 41 oliveti pugliesi sottoposti ai monitoraggi.

8.3.2.1 Campionamento degli stadi preimmaginali

Le popolazioni ninfali sono state monitorate con il metodo del campionamento a quadrato (tecnica del transetto), frequentemente utilizzato per quantificare la densità delle ninfe di sputacchina (Biedermann, 2003; Cornara et al., 2018; Dongiovanni et al., 2019) e riconosciuto dall'EFSA (Vos et al., 2019). In ogni data di campionamento, 30 quadrati di 0,25 m² (100 cm × 25 cm) sono stati posizionati casualmente sulla copertura del suolo all'interno di ogni Unità di Campionamento (UdC). La vegetazione e la superficie del suolo all'interno del quadrato sono state ispezionate con attenzione per individuare gli instar di *P.spumarius*, che sono stati contati e il cui stadio di sviluppo determinato direttamente sul campo utilizzando la chiave di identificazione di Vilbaste (1982) e di Picciotti et al., 2021. I campionamenti di sputacchina sono stati conservativi e le ninfe non sono state raccolte per evitare interazioni con la dinamica della popolazione durante la stagione. Solo alcune ninfe sono state allevate in laboratorio fino allo stadio di adulti per confermare la loro specie. A causa delle condizioni meteorologiche sfavorevoli non è stato possibile anticipare i campionamenti, che pertanto sono iniziati a fine marzo. Le prime fasi dello sviluppo ninfale (Instar 1° e 2°) sono state osservate solo tardivamente.

8.3.2.2 Campionamento dello stadio adulto

Gli adulti di sputacchina sono stati campionati con una rete a maglie larghe (38 cm di diametro) su tre diversi tipi di vegetazione all'interno di ciascun oliveto: copertura erbacea, olivi e piante legnose selvatiche (arbusti o alberi che crescono all'interno o nelle immediate vicinanze dell'oliveto). La rete si è dimostrata il metodo di campionamento più affidabile per lo stadio

adulto delle sputacchine (Bodino et al., 2017; Morente et al., 2018). I campionamenti sono stati effettuati in ogni data in punti casuali all'interno dell'oliveto sperimentale, per evitare di disturbare ripetutamente gli stessi punti durante la stagione.

Gli individui nella vegetazione al suolo sono stati campionati in 30 unità di campionamento distribuite in modo casuale.

Sulle chiome degli olivi, gli insetti sono stati campionati utilizzando una rete da spazzamento (38 cm di diametro) con un bastone lungo 2 m su 20 olivi distribuiti in modo casuale; su ogni pianta sono state eseguite 10 spazzate, distribuite sull'intera chioma degli olivi.

8.3.3 Dati meteorologici

Al fine di poter computare le risorse termiche ed analizzare la loro relazione con lo sviluppo di *P. spumarius*, si è provveduto al calcolo delle serie termiche giornaliere (temperatura massima e minima) per i 41 siti di monitoraggio; partendo poi dalla rete meteorologica delle stazioni Horta, si è provveduto alla spazializzazione dei dati.

La metodologia di spazializzazione prevede i seguenti passaggi (Mariani, Parisi, Cola, & Failla, 2012; Mariani, Cola, Bulgari, Ferrante, & Martinetti, 2016; Cola, Mariani, Maghradze, & Failla, 2020):

- omogeneizzazione dei dati di temperatura delle stazioni della rete Horta all'altitudine della stazione incognita, considerando un gradiente pari a -0.5°C ogni 100 metri di aumento di quota;
- omogeneizzazione dei dati di temperatura delle stazioni della rete Horta alla esposizione della stazione incognita mediante i gradienti climatologici;
- spazializzazione del dato omogeneizzato mediante il metodo dell'inverso del quadrato della distanza.

Le serie termiche giornaliere così ottenute sono state utilizzate per il computo delle risorse termiche giornaliere.

8.3.4 Sviluppo del modello empirico basato sui gradi-giorno

Per studiare la fenologia di *P. spumarius*, in relazione alla legge delle temperature effettive totali e delle soglie termiche individuate nella ricerca bibliografica, si è proceduto a definire le costanti termiche in relazione ai dati osservati in campo.

Per questo i dati relativi alla temperatura media giornaliera dell'aria, espressi in gradi Celsius ($^{\circ}\text{C}$), sono stati utilizzati per calcolare l'accumulo dei gradi-giorno di sviluppo (*GDD*) dei 41 siti, secondo la seguente formula:

$$GDD = \sum_{i=1}^n \max[0, (T_i - T_{min})] \quad (1)$$

dove n è il numero di giorni nell'arco temporale indagato, dal 1° gennaio al 23 maggio; T_i è la temperatura media dell'aria giornaliera i ; e T_{min} rappresenta la temperatura di soglia inferiore di sviluppo per *P. spumarius*.

Il 1° gennaio è stato definito come data di inizio accumulo (*Biological fix*) dei *GDD*.

La relazione tra la sommatoria dei *GDD* e le rispettive percentuali dei diversi stadi osservati nei 41 siti è stata espressa attraverso regressioni lineari.

I parametri delle equazioni sono stati stimati utilizzando la procedura di regressione non lineare di *SPSS* (versione 26; *IBM SPSS Statistics, IBM Corp., USA*), che minimizza le somme dei quadrati residui utilizzando l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (Vandaele, 1983). La bontà dell'adattamento è stata valutata considerando l'entità degli errori standard dei parametri del modello, la distribuzione dei residui dei valori previsti rispetto a quelli osservati, il coefficiente di determinazione (R^2), il coefficiente di determinazione aggiustato (R^2_{adj}).

8.4 Risultati e discussione

8.4.1 Ricerca bibliografica

La ricerca in letteratura ha permesso di ottenere un totale di 51 pubblicazioni, oltre a quelle già citate nel terzo capitolo tra questi, 3 sono stati fondamentali per l'individuazione delle soglie termiche di sviluppo dell'insetto.

La ricerca bibliografica, altresì, ha portato ad un approfondimento preliminare della modellistica entomologica, ponendo un focus sui modelli fenologici lineari o non lineari e i modelli di dinamica di popolazione in relazione anche ai principali aspetti biologici e fenologici dell'insetto.

Sono state individuate diverse soglie termiche minime relative alla sputacchina (2,8°C, 5°C, 7°C e 10°C) indicate da risultati di esperimenti condotti a temperature controllate e di pieno campo, da West & Lees (1988), Chmiel & Curtis Wilson (1979) e Zajac, Hall, & Wilsons, (1989).

8.4.2 Sviluppo del modello empirico basato sui gradi-giorno

In funzione delle quattro soglie termiche individuate sono stati determinati gli accumuli di *GDD* dei 41 siti attraverso l'equazione (1), ottenendo in questo modo sommatorie di $GDD_{2,8^{\circ}\text{C}}$, $GDD_{5^{\circ}\text{C}}$, $GDD_{7^{\circ}\text{C}}$ e $GDD_{10^{\circ}\text{C}}$.

Il secondo passo è stato quello di confrontare la correlazione tra i dati osservati nei siti con i 4 distinti *GDD* cumulati alle diverse soglie termiche. Si è proceduto poi nella definizione delle regressioni lineari e dei corrispondenti coefficienti di correlazione, mettendo in relazione la percentuale degli stadi di sviluppo di *P. spumarius* osservati durante la stagione 2019, con i rispettivi *GDD* cumulati calcolati a partire dalle 4 soglie termiche.

Le regressioni lineari previsione/osservazione hanno generalmente soddisfatto i criteri per una stima non distorta; fatta eccezione per gli instar 1 e instar 2 (Tabella 2).

La rappresentazione grafica di tali regressioni lineari è riportata in figura 4 (Instar 1), figura 5 (Instar 2), figura 6 (Instar 3), figura 7 (Instar 4), figura 8 (Instar 5) e figura 9 (Adulti).

La mancanza di dati sulla densità della popolazione, in modo particolare all'avvio, degli stadi instar 1 e instar 2, ha impedito di ottenere regressioni lineari che presentassero un R^2 e R^2_{adj} superiore a 0,7 ed errori standard ammissibili.

Dai risultati ottenuti le funzioni meglio adattate risultano essere, per ogni instar, quelle che mettono in relazione il dato osservato e i $GDD_{2,8^{\circ}\text{C}}$ cumulati, aventi soglia termica inferiore pari a $2,8^{\circ}\text{C}$ (Tabella 3), come testimoniato sia R^2 che R^2_{adj} , andando a confermare gli studi di Chmiel & Wilson (1979b) e Zajac (1989), realizzati sul *P. spumarius* nel Nord America.

Le regressioni lineari degli stadi di sviluppo di *P. spumarius* (Instar 3, Instar 4, Instar 5 e Adulto) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati e i gradi giorno cumulati alle soglie termiche di $2,8^{\circ}\text{C}$ sono rappresentate graficamente in figura 10.

Una volta identificate le funzioni statisticamente più attendibili è stato possibile individuare alcuni aspetti ecologici rilevanti dell'insetto e tra questi: i) i *GDD* cumulati dal 1° gennaio necessari per la comparsa dei primi individui di uno stadio (GDD_{min}); ii) i *GDD* cumulati dal 1° gennaio oltre i quali non è più possibile osservare individui di un determinato stadio (GDD_{max}) e iii) la durata di uno stadio (GDD_{Δ}), ovvero la differenza tra GDD_{max} e GDD_{min} (Tabella 3).

Stadio di sviluppo	Soglia termica inferiore	Funzione di Regressione Lineare	Parametri α = Pendenza (ES) β = Intercetta (ES)	R ²	R ² _{adj}	Errore Standard	Sig. F
Instar 1	2,8 °C	$y = 1E-05x + 0,8597$	$\alpha = 0 (\pm 0,0001)$ $\beta = 0,8597 (\pm 0,01)$	0,00	-0,01	0,19	0,929681869
	5 °C	$y = 0,0004x + 0,689$	$\alpha = 0,0004 (\pm 0,0001)$ $\beta = 0,689 (\pm 0,06)$	0,09	0,08	0,18	0,003874011
	7 °C	$y = 0,0005x + 0,7399$	$\alpha = 0,0005 (\pm 0,0002)$ $\beta = 0,7399 (\pm 0,05)$	0,08	0,07	0,18	0,008576339
	10 °C	$y = 0,0008x + 0,7973$	$\alpha = 0,0008 (\pm 0,0003)$ $\beta = 0,7973 (\pm 0,04)$	0,05	0,04	0,18	0,03
Instar 2	2,8 °C	$y = 0,0014x - 0,1641$	$\alpha = 0,0014 (\pm 0,0001)$ $\beta = -0,1641 (\pm 0,07)$	0,55	0,55	0,19	7,39329E-31
	5 °C	$y = 0,0016x + 0,0316$	$\alpha = 0,0016 (\pm 0,0001)$ $\beta = 0,0316 (\pm 0,06)$	0,51	0,51	0,20	9,62867E-28
	7 °C	$y = 0,002x + 0,1965$	$\alpha = 0,002 (\pm 0,0002)$ $\beta = 0,1965 (\pm 0,05)$	0,47	0,47	0,21	4,07459E-25
	10 °C	$y = 0,0033x + 0,4091$	$\alpha = 0,0033 (\pm 0,0003)$ $\beta = 0,4091 (\pm 0,04)$	0,39	0,39	0,22	8,4556E-20
Instar 3	2,8 °C	$y = 0,0019x - 0,744$	$\alpha = 0,0019 (\pm 0,0001)$ $\beta = -0,744 (\pm 0,08)$	0,68	0,67	0,21	1,59537E-50
	5 °C	$y = 0,0023x - 0,4854$	$\alpha = 0,0023 (\pm 0,0001)$ $\beta = -0,4854 (\pm 0,06)$	1	0,63	0,23	4,75477E-45
	7 °C	$y = 0,0028x - 0,2618$	$\alpha = 0,0028 (\pm 0,0002)$ $\beta = -0,2618 (\pm 0,05)$	0,60	0,59	0,24	5,43527E-41
	10 °C	$y = 0,0047x + 0,0308$	$\alpha = 0,0047 (\pm 0,0003)$ $\beta = 0,0308 (\pm 0,04)$	0,52	0,52	0,26	1,98143E-33
Instar 4	2,8 °C	$y = 0,0021x - 1,0835$	$\alpha = 0,0021 (\pm 0,0001)$ $\beta = -1,0835 (\pm 0,07)$	0,75	0,75	0,20	1,16267E-57
	5 °C	$y = 0,0025x - 0,7953$	$\alpha = 0,0025 (\pm 0,0001)$ $\beta = -0,7953 (\pm 0,06)$	0,71	0,71	0,22	1,09456E-51
	7 °C	$y = 0,0031x - 0,5348$	$\alpha = 0,0031 (\pm 0,0001)$ $\beta = -0,5348 (\pm 0,06)$	0,68	0,68	0,23	1,93049E-47
	10 °C	$y = 0,0049x - 0,1799$	$\alpha = 0,0049 (\pm 0,0003)$ $\beta = -0,1799 (\pm 0,04)$	0,62	0,62	0,25	1,01886E-40
Instar 5	2,8 °C	$y = 0,0023x - 1,5221$	$\alpha = 0,0023 (\pm 0,0001)$ $\beta = -1,5221 (\pm 0,08)$	0,79	0,79	0,19	5,07573E-56
	5 °C	$y = 0,0027x - 1,1811$	$\alpha = 0,0027 (\pm 0,0001)$ $\beta = -1,1811 (\pm 0,08)$	0,74	0,74	0,21	4,07858E-49
	7 °C	$y = 0,0033x - 0,8711$	$\alpha = 0,0033 (\pm 0,0002)$ $\beta = -0,8711 (\pm 0,07)$	0,71	0,70	0,22	1,0891E-44
	10 °C	$y = 0,005x - 0,4457$	$\alpha = 0,005 (\pm 0,0003)$ $\beta = -0,4457 (\pm 0,05)$	0,66	0,66	0,24	2,53473E-39
Adulti	2,8 °C	$y = 0,0021x - 1,6723$	$\alpha = 0,0021 (\pm 0,0001)$ $\beta = -1,6723 (\pm 0,11)$	0,76	0,76	0,20	4,25784E-35
	5 °C	$y = 0,0024x - 1,3306$	$\alpha = 0,0024 (\pm 0,0001)$ $\beta = -1,3306 (\pm 0,1)$	0,74	0,73	0,21	3,97499E-33
	7 °C	$y = 0,0029x - 1,0265$	$\alpha = 0,0029 (\pm 0,0002)$ $\beta = -1,0265 (\pm 0,09)$	0,72	0,72	0,22	1,9691E-31
	10 °C	$y = 0,0044x - 0,6006$	$\alpha = 0,0044 (\pm 0,0003)$ $\beta = 0,6006 (\pm 0,07)$	0,68	0,68	0,23	9,53354E-29

Tabella 7: Le analisi di regressione lineari, relative allo sviluppo di uno specifico stadio della sputacchina osservati durante i monitoraggi rispetto ai quattro GDD cumulati in funzione delle 4 soglie termiche inferiori.

Stadio di sviluppo	Funzione di Regressione Lineare	GDD _{min}	GDD _{max}	GDD _Δ
Instar 2	$y = 0,0014x - 0,1641$	117	832	714
Instar 3	$y = 0,0019x - 0,744$	392	918	526
Instar 4	$y = 0,0021x - 1,0835$	516	992	476
Instar 5	$y = 0,0023x - 1,5221$	662	1097	435
Adulti	$y = 0,0021x - 1,6723$	796	1273	476

Tabella 3: GDD_{min}: i GDD necessari per la comparsa dei primi individui di uno stadio; GDD_{max}: i GDD oltre i quali non è più possibile osservare individui di un determinato stadio; la durata di uno stadio (GDD_Δ)

La durata di uno stadio riguarda specificatamente il periodo di tempo in cui i membri di un determinato instar possono essere osservati sul campo; tale aspetto fornisce importanti informazioni in senso ecologico, poiché riflette la dinamica della popolazione del parassita in una situazione di campo.

I risultati mostrano che la durata della comparsa dei primi stadi di sviluppo è maggiore rispetto a quelli degli altri stadi (Tabella 3). Questo risultato non è sorprendente perché i cambiamenti fisiologici associati allo sviluppo soprattutto dei primi instar richiedono un maggiore apporto energetico.

Le ninfe di terzo stadio di *Philaenus spumarius* sono state rilevate a partire già dal primo campionamento, avvenuto in data 25 marzo, in 24 dei 41 siti totali. Il tempo fisiologico di comparsa del terzo instar, considerando la baseline di 2.8°C, è variato da un minimo di 371 GDD nel sito 23 al valore massimo di 618 GDD nel sito numero 1. Il picco nelle catture per questo instar è stato registrato nella data di campionamento del 9 maggio, quando risultavano accumulati, tra tutti i siti di interesse, mediamente 925 GDD.

Durante il campionamento avvenuto in data 25 marzo sono stati rilevati individui di *P. spumarius* al quarto stadio ninfale limitatamente ad 8 siti su 41. In tale data, erano stati accumulati mediamente 549 GDD. A partire dalle date successive, le catture di ninfe appartenenti al quarto stadio sono aumentate fino a raggiungere il picco nel primo campionamento di maggio, svolto il giorno 9, corrispondente ad un accumulo medio nei siti interesse di 929 GDD.

La prima cattura di individui appartenenti al quinto stadio ninfale, invece, è avvenuta in data 3 aprile, in 3 dei 41 siti, con un minimo di 630 GDD e 704 GDD mediamente accumulati. Anche il picco del quinto stadio ninfale, così come per i due precedenti, è stato registrato con il campionamento del 9 maggio. Il picco si è mantenuto fino al campionamento successivo, svolto in data 23 maggio, senza mostrare segni di decrescita nel numero di individui catturati.

Infine, i primi voli degli adulti sono stati registrati nel corso del campionamento del 18 aprile con un minimo di 796 GDD accumulati nel sito 5 e una media di 871 GDD accumulati nei

diversi siti. Il picco di volo si è registrato più di un mese più tardi, in data 23 maggio. I *GDD* medi accumulati in tale data risultano essere 1241.

La progressione degli stadi giovanili di *P. spumarius* si è verificata come una serie di distribuzioni altamente sovrapposte che si sono estese per tutto il periodo di campionamento; in effetti, in ogni data sono stati trovati contemporaneamente diversi stadi ninfali, e talvolta, anche il picco di due generazioni differenti è risultato sovrapposto. Tuttavia, nonostante per il terzo, quarto e quinto stadio ninfale sia stato registrato il picco in data 09/05/2022, è importante sottolineare che le unità di calore accumulate nei diversi siti in cui sono stati identificati i diversi picchi in tale data, erano estremamente differenti, passando dai 500 *GDD* medi registrati in corrispondenza del picco del terzo stadio fino ai 1041 *GDD* medi accumulati in corrispondenza della massima presenza del quinto stadio ninfale.

La durata di comparsa di ciascun stadio fino all'adulto di sputacchina negli oliveti è stata rispettivamente di 714, 526, 476, 435 e 476 *GDD* cumulati.

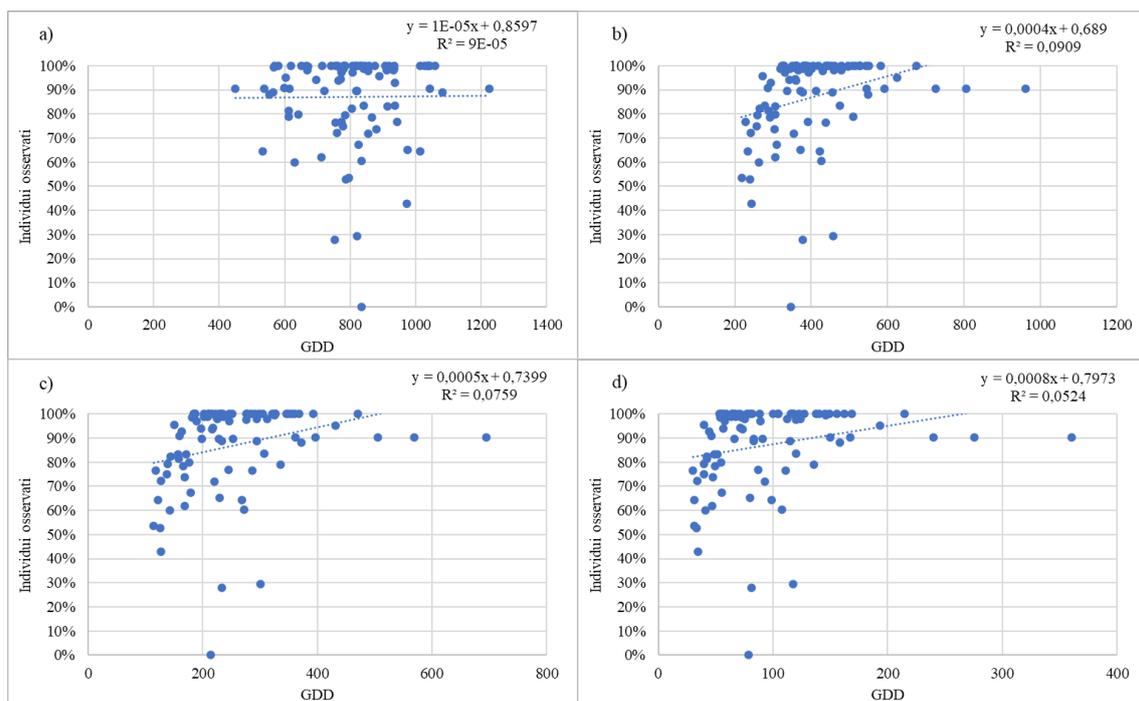


Figura 20: Regressioni lineari del primo stadio ninfale di *P. spumarius* (Instar 1) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alle soglie termiche di 2.8 °C (a), 5°C (b), 7°C (c) e 10°C (d).

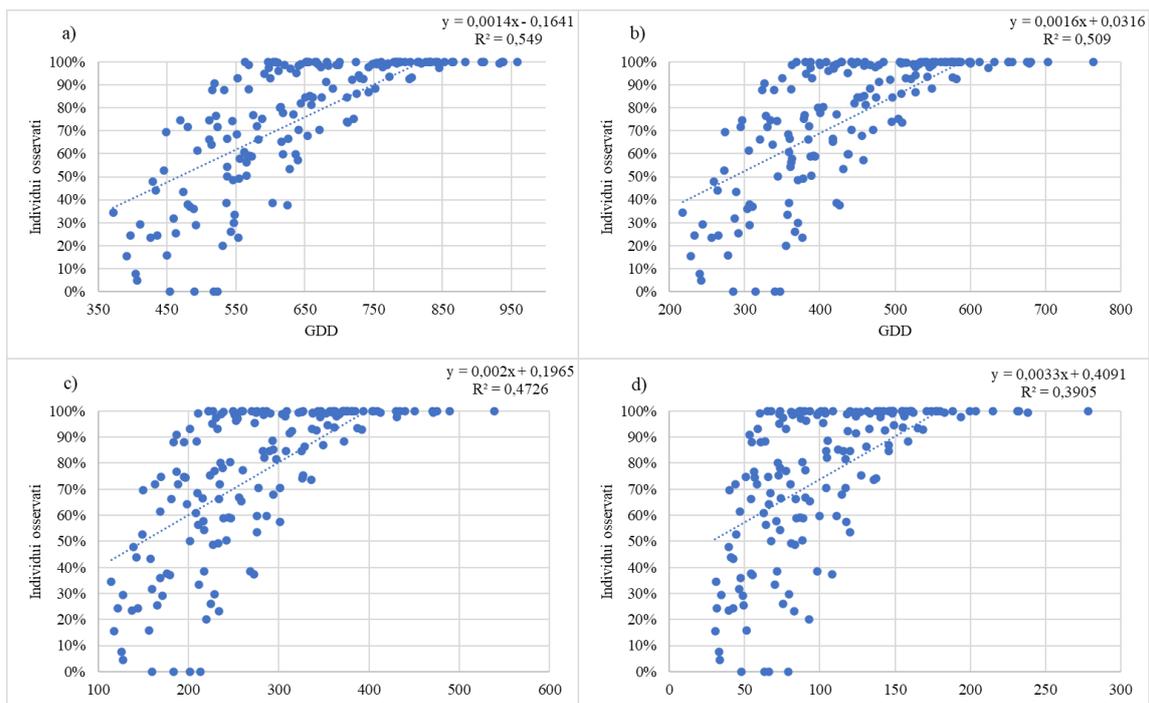


Figura 21: Regressioni lineari del secondo stadio ninfale di *P. spumarius* (Instar 2) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alle soglie termiche di 2.8 °C (a), 5°C (b), 7°C (c) e 10°C (d).

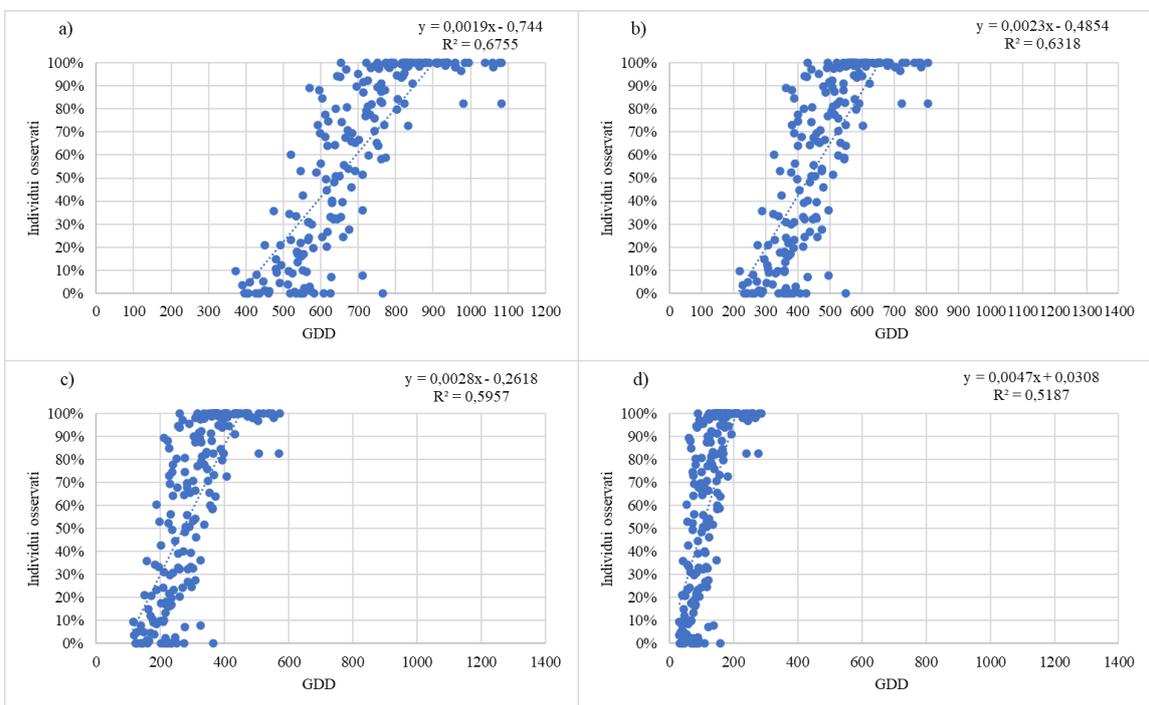


Figura 22: Regressioni lineari del terzo stadio ninfale di *P. spumarius* (Instar 3) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alle soglie termiche di 2.8 °C (a), 5°C (b), 7°C (c) e 10°C (d).

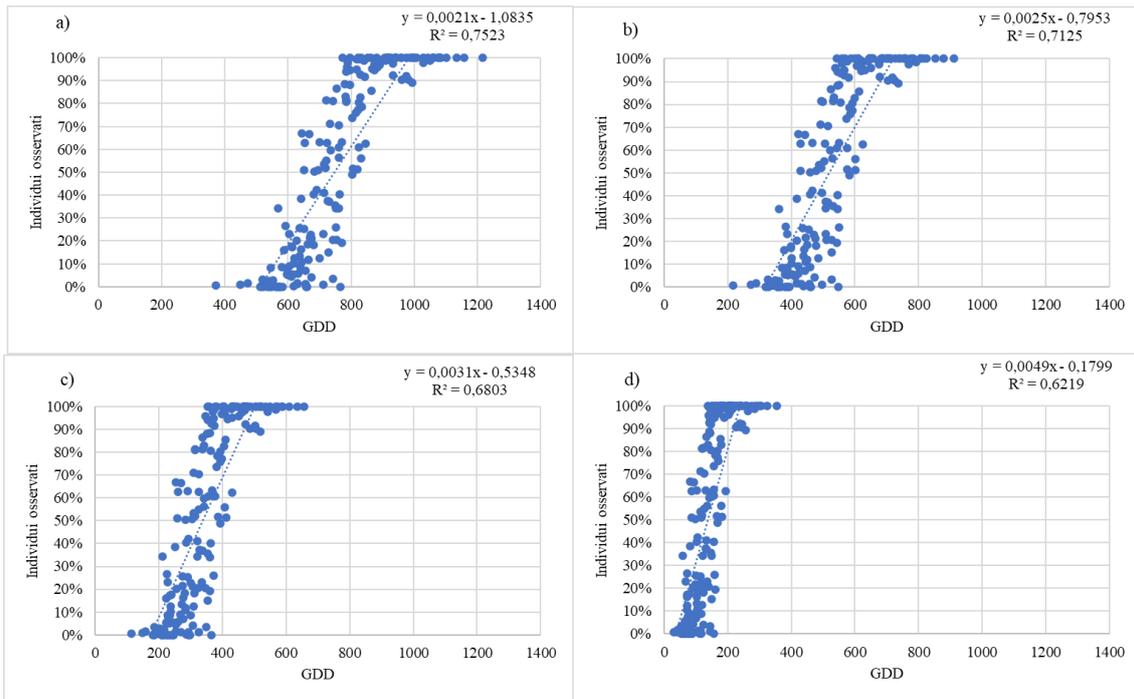


Figura 23: Regressioni lineari del quarto stadio ninfale di *P. spumarius* (Instar 4) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alle soglie termiche di 2.8 °C (a), 5°C (b), 7°C (c) e 10°C (d).

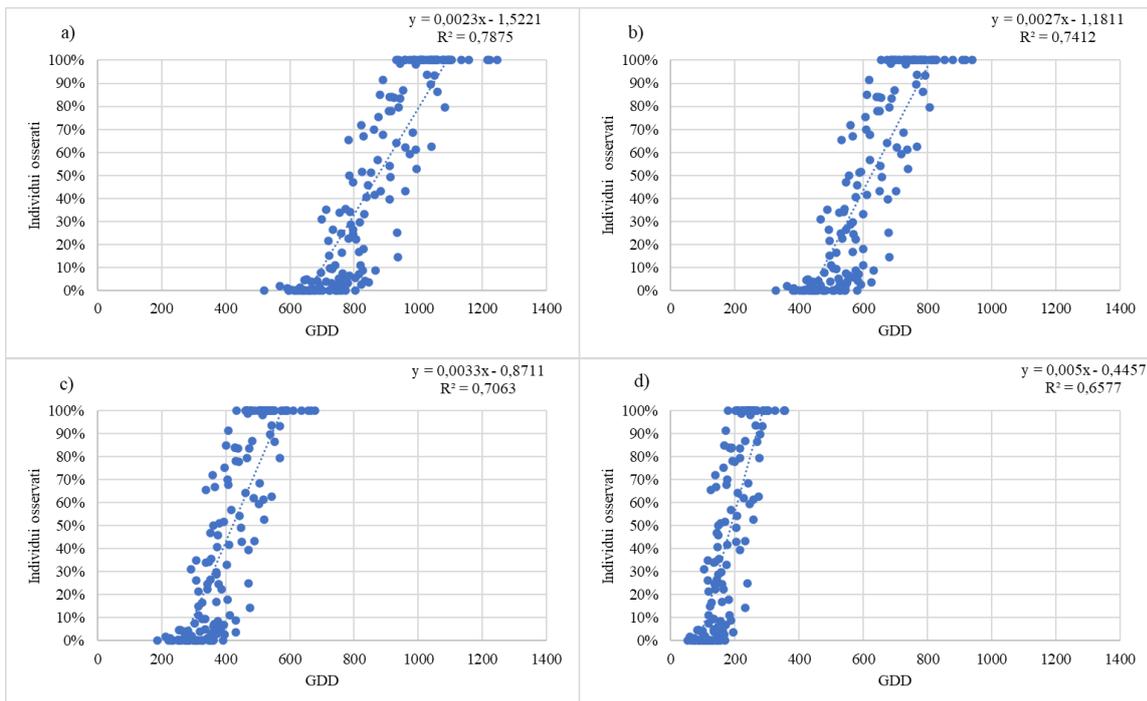


Figura 24: Regressioni lineari del quinto stadio ninfale di *P. spumarius* (Instar 5) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alle soglie termiche di 2.8 °C (a), 5°C (b), 7°C (c) e 10°C (d).

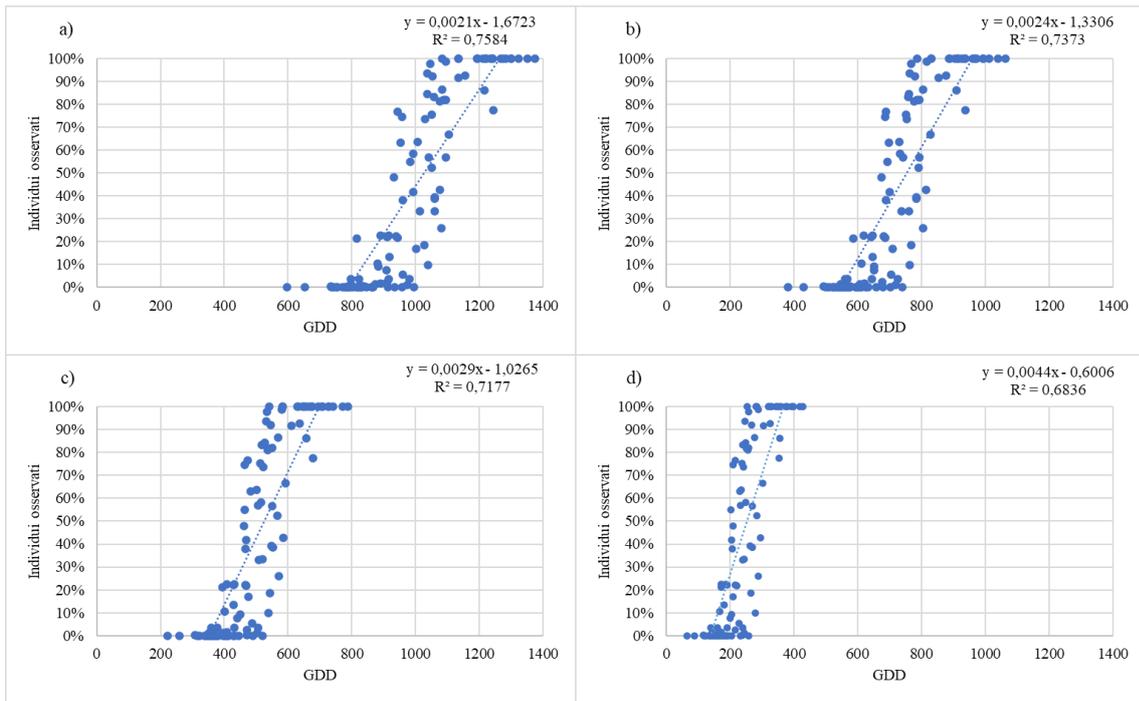


Figura 25: Regressioni lineari dello stadio adulto di *P. spumarius* (Adulti) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alle soglie termiche di 2.8 °C (a), 5°C (b), 7°C (c) e 10°C (d).

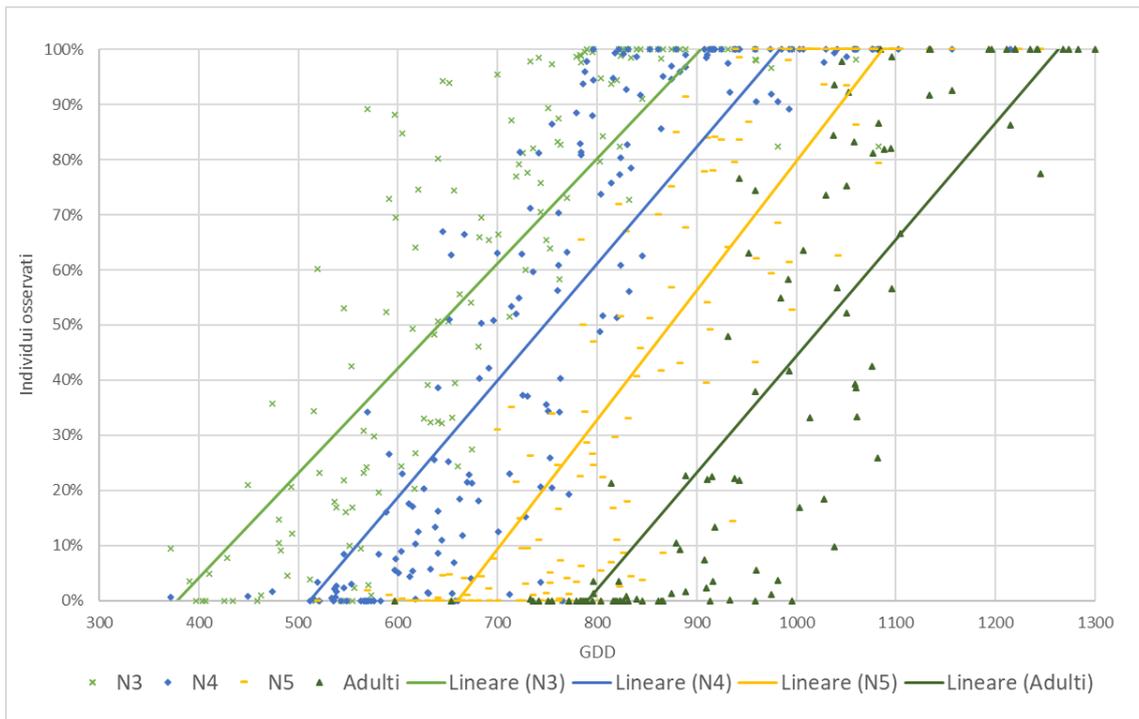


Figura 26: Regressioni lineari degli stadi di sviluppo di *P. spumarius* (Instar 3, Instar 4, Instar 5 e Adulto) ottenute dalla relazione tra la percentuale degli individui osservati, riportata sull'asse y, e i gradi giorno cumulati, sull'asse x, alla soglia termica di 2.8 °C.

8.5 Conclusioni

Sebbene siano necessari ulteriori studi per risolvere alcune criticità emerse da questa preliminare attività di ricerca, i principali scopi attesi sono stati raggiunti. Per migliorare la solidità dei risultati ottenuti, una delle possibili strade di sviluppo dello studio potrebbe essere quella di aumentare il numero di monitoraggi, iniziando già nel mese di gennaio e impostando l'attività su almeno un triennio, con l'obiettivo di osservare anche i primi stadi di sviluppo dell'insetto (uova, instar 1 e instar 2).

L'importanza pratica delle informazioni ottenute in questo studio è duplice: in primo luogo, fornisce informazioni biologiche ed ecologiche di base sullo sviluppo dell'insetto nel contesto italiano, aspetto volto a migliorare la comprensione delle relazioni ospite-parassita nel contesto mediterraneo e delle dinamiche di campo delle popolazioni di sputacchina dei prati.

in secondo luogo, questi primi risultati sono un passo fondamentale per la realizzazione di modelli più complessi e che possano prendere in considerazione la dinamica di popolazione. L'individuazione della soglia termica inferiore sarà infatti un elemento fondamentale nella realizzazione di funzione del tasso di sviluppo.

8.6 Bibliografia

- Akers, R. C., & Nielsen, D. G. (1984). Predicting *Agrilus anxius* Gory (Coleoptera: Buprestidae) Adult Emergence by Heat Unit Accumulation. *Journal of Economic Entomology*, 77(6), 1459–1463. <https://doi.org/10.1093/jee/77.6.1459>
- Allsop, P. G., & Butler, D. G. (1987). Estimating day-degrees from daily maximum-minimum temperatures: a comparison of techniques for a soil-dwelling insect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 41, 165–172.
- Baumgärtner, J., Gutierrez, A. P., & Klay, A. (1988). Elements for modelling the dynamics of tritrophic population interactions. *Experimental & Applied Acarology*, 5(3), 243–263. <https://doi.org/10.1007/BF02366097>
- Biedermann, R. (2003). Aggregation and survival of *Neophilaenus albipennis* (Hemiptera: Cercopidae) spittlebug nymphs. *European Journal of Entomology*, 100(4), 493–499. <https://doi.org/10.14411/eje.2003.075>
- Bodino, N., Cavalieri, V., Dongiovanni, C., Saladini, M. A., Simonetto, A., Volani, S., ... Gilioli, G. (2020). Spittlebugs of Mediterranean olive groves: Host-plant exploitation throughout the year. *Insects*, 11(130).

- Bodino, N., Plazio, E., Picciau, L., Dongiovanni, E. C. V., Di Carolo, M., Tauro, D., ... Bosco, D. (2017). Phenology population dynamics and host plants of *Philaenus spumarius* in Italian olive groves. In *European conference on Xylella 2017. Finding answers to a global problem*. (p. 19).
- Bostanian, N. J., Bourgeois, G., Vincent, C., Plouffe, D., Trudeau, M., & Lasnier, J. (2006). Modeling leafhopper nymphs in temperate vineyards for optimal sampling. *Environmental Entomology*, 35(6), 1477–1482. [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2006\)35\[1477:MLNITV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2006)35[1477:MLNITV]2.0.CO;2)
- Bressan, A., Larrue, J., & Padieu, E. B. (2005). Patterns of phytoplasma-infected and infective *Scaphoideus titanus* leafhoppers in vineyards with high incidence of Flavescence dorée. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 119, 61–69.
- CE/29. (2000). DIRETTIVA 2000/29/CE DEL CONSIGLIO dell'8 maggio 2000 concernente le misure di protezione contro l'introduzione nella Comunità di organismi nocivi ai vegetali o ai prodotti vegetali e contro la loro diffusione nella Comunità.
- Chmiel, S. M., & Curtis Wilson, M. (1979). Estimating threshold temperature and heat unit accumulation required for meadow spittlebug egg hatch. *Environmental Entomology*, 8(6), 612–614. <https://doi.org/10.1093/ee/8.4.612>
- Cola, G., Mariani, L., Maghradze, D., & Failla, O. (2020). Changes in thermal resources and limitations for Georgian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 26(1), 29–40. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12412>
- Cornara, D., Bosco, D., & Fereres, A. (2018). *Philaenus spumarius*: when an old acquaintance becomes a new threat to European agriculture. *Journal of Pest Science*, 91(3), 957–972. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0966-0>
- Cornara, D., Cavalieri, V., Dongiovanni, C., Altamura, G., Palmisano, F., Bosco, D., ... Saponari, M. (2017). Transmission of *Xylella fastidiosa* by naturally infected *Philaenus spumarius* (Hemiptera, Aphrophoridae) to different host plants. *Journal of Applied Entomology*, 141(1–2), 80–87. <https://doi.org/10.1111/jen.12365>
- Cornara, D., Saponari, M., Zeilinger, A. R., de Stradis, A., Boscia, D., Loconsole, G., ... Porcelli, F. (2017). Spittlebugs as vectors of *Xylella fastidiosa* in olive orchards in Italy. *Journal of Pest Science*, 90(2), 521–530.

- Cossu, Q. A., Delirio, G., Di Cola, G., & Gilioli, G. (n.d.). Modelli matematici nella protezione integrata delle colture in Sardegna. In *Agrometeorologia per la Sardegna*. SardegnaArpa. Retrieved from <http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/notetecniche/note.asp>
- Damos, P., & Savopoulou-Soultani, M. (2012). Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements. *Psyche*, 2012(123405), 1–13. <https://doi.org/10.1155/2012/123405>
- Damos, P. T., & Savopoulou-Soultani, M. (2011). Microlepidoptera of Economic Significance in Fruit Production: Challenges, Constraints and Future Perspective for Integrated Pest Management. In L. Cauteruccio (Ed.), *Moths: Types, Ecological Significance and Control*. Nova Science Publishers, Inc.
- Daugherty, M. P., & Almeida, R. P. P. (2009). Estimating *Xylella fastidiosa* transmission parameters: Decoupling sharpshooter number and feeding period. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 132(1), 84–92. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2009.00868.x>
- DeAngelis, D. L., & Grimm, V. (2014). Individual-based models in ecology after four decades. *F1000Prime Reports*, 6(39), 6. <https://doi.org/10.12703/P6-39>
- Dongiovanni, C., Cavalieri, V., Bodino, N., Tauro, D., Di Carolo, M., Fumarola, G., ... Bosco, D. (2019). Plant Selection and Population Trend of Spittlebug Immatures (Hemiptera: Aphrophoridae) in Olive Groves of the Apulia Region of Italy. *Journal of Economic Entomology*, 112(1), 67–74. <https://doi.org/10.1093/jee/toy289>
- European Parliament. (2016). Regulation (EU) 2016/2031 of the European Parliament of the Council of 26 October 2016 on protective measures against pests of plants, amending Regulations (EU) 228/2013,(EU) 652/2014 and (EU) 1143/2014 and repealing Council Directives 69/464/EEC, 74/647/. Retrieved July 10, 2022, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32016R2031>
- Gallardo, A., Ocete, R., López, M. A., Maistrello, L., Ortega, F., Semedo, A., & Soria, F. J. (2009). Forecasting the flight activity of *Lobesia botrana* (Denis & Schiffermüller) (Lepidoptera, Tortricidae) in Southwestern Spain. *Journal of Applied Entomology*, 133(8), 626–632. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2009.01417.x>

- Getz, W. M., & Gutierrez, A. P. (1982). A Perspective on Systems Analysis in Crop Production and Insect Pest Management. *Annual Review of Entomology*, 27(1), 447–466. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.27.010182.002311>
- Gilioli, G., & Pasquali, S. (2007). Use of individual-based models for population parameters estimation. *Ecological Modelling*, 200(1–2), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.07.017>
- Gilioli, G., Pasquali, S., & Marchesini, E. (2016). A modelling framework for pest population dynamics and management: An application to the grape berry moth. *Ecological Modelling*, 320, 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.10.018>
- Hardman, J. M. (2012). Modeling arthropods to support IPM in vineyards. In N. J. Bostanian, C. Vincent, & R. Isaacs (Eds.), *Arthropod management in vineyards: Pests, approaches, and future directions* (pp. 37–52). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4032-7_1
- Jones, V. P., & Brunner, J. F. (1993). Degree-Day Models. Retrieved August 12, 2022, from [http://treefruit.wsu.edu/crop-protection/opm/dd-models/#:~:text=Phenology models%2C also known as,temperature where it is found.](http://treefruit.wsu.edu/crop-protection/opm/dd-models/#:~:text=Phenology%2C%20also%20known%20as,temperature%20where%20it%20is%20found.)
- Magarey, R. D., & Isard, S. A. (2017). A troubleshooting guide for mechanistic plant pest forecast models. *Journal of Integrated Pest Management*, 8(1), 1–7. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmw015>
- Magarey, R. D., Travis, J. W., Russo, J. M., Seem, R. C., & Magarey, P. A. (2002). Decision support systems: Quenching the thirst. *Plant Disease*, 86(1), 4–14. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.1.4>
- Mariani, L., Cola, G., Bulgari, R., Ferrante, A., & Martinetti, L. (2016). Space and time variability of heating requirements for greenhouse tomato production in the Euro-Mediterranean area. *Science of the Total Environment*, 562, 834–844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.057>
- Mariani, L., Parisi, S. G., Cola, G., & Failla, O. (2012). Climate change in Europe and effects on thermal resources for crops. *International Journal of Biometeorology*, 56(6), 1123–1134. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0528-8>
- Mipaaf. (n.d.). Modelli fenologici. Retrieved August 12, 2022, from <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/6101>

- Moravie, M. A., Davison, A. C., Pasquier, D., & Charmillot, P. J. (2006). Bayesian forecasting of grape moth emergence. *Ecological Modelling*, *197*(3–4), 478–489. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.030>
- Morente, M., Cornara, D., Plaza, M., Durán, J. M., Capiscol, C., Trillo, R., ... Fereres, A. (2018). Distribution and relative abundance of insect vectors of *Xylella fastidiosa* in olive groves of the Iberian peninsula. *Insects*, *9*(4). <https://doi.org/10.3390/insects9040175>
- Munns, W. R., Gervais, J., Hoffman, A. A., Hommen, U., Nacci, D. E., Nakamaru, M., ... Topping, C. J. (2007). Modeling approaches to population-level ecological risk assessment. In L. W. Barnhouse, W. R. Munns, & M. T. Sorensen (Eds.), *Population-level ecological risk assessment*. Boca Raton (pp. 179–210). CRC Press.
- Picciotti, U., Lahbib, N., Sefa, V., Porcelli, F., & Garganese, F. (2021). Aphrophoridae role in *Xylella fastidiosa* subsp. *Pauca* ST53 invasion in southern Italy. *Pathogens*, *10*(8), 25. <https://doi.org/10.3390/pathogens10081035>
- Regione Puglia. (2022). Piano d'azione per contrastare la diffusione di *Xylella fastidiosa* (Well et al.) in Puglia.
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, *51*(3), 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038
- Saponari, M., Giampetruzzi, A., Loconsole, G., Boscia, D., & Saldarelli, P. (2019). *Xylella fastidiosa* in olive in apulia: Where we stand. *Phytopathology*, *109*(2), 175–186. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0319-FI>
- Saponari, M., Loconsole, G., Cornara, D., Yokomi, R. K., De Stradis, A., Boscia, D., ... Porcelli, F. (2014). Infectivity and transmission of *Xylella fastidiosa* by *Philaenus spumarius* (Hemiptera: Aphrophoridae) in Apulia, Italy. *Journal of Economic Entomology*, *107*(4), 1316–1319. <https://doi.org/10.1603/EC14142>
- Sharpe, P. J. H., Curry, G. L., DeMichele, D. W., & Cole, C. L. (1977). Distribution model of organism development times. *Journal of Theoretical Biology*, *66*(1), 21–38. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(77\)90309-5](https://doi.org/10.1016/0022-5193(77)90309-5)
- Tobin, P. C., Nagarkatti, S., & Saunders, M. C. (2001). Modeling development in grape berry moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, *30*(4), 692–699. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-30.4.692>

- Vandaele, W. (1983). *Applied Time Series and Series and Box - Jenkins Models*. Orlando: Academic Press.
- Vilbaste, J. (1982). Preliminary key for the identification of the nymphs of North European Homoptera Cicadinea. II. Cicadelloidea. *Ann. Zool. Fennici*.
- Vos, S., Camilleri, M., Diakaki, M., Lázaro, E., Parnell, S., Schrader, G., & Vicent, A. (2019). Pest survey card on *Xylella fastidiosa*. *EFSA Supporting Publications*, 16(6). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.en-1667>
- Wagner, T. L., Wu, H., Sharpe, P. J. H., & Coulson, R. N. (1984). Modeling Distributions of Insect Development Time: a Literature Review and Application of the Weibull Function. *Annals of the Entomological Society of America*, 77(5), 475–483. <https://doi.org/10.1093/aesa/77.5.475>
- Weaver, C. R., & King, D. R. (1954). Meadow spittlebug, *Philaenus leucophthalmus* (L.). *Ohio Agricultural Experiment Station. Research Bulletin*, 741, 1–99. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1811/63036%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Meadow+spittlebug#1>
- West, J., & Lees, D. R. (1988). Temperature and egg development in the spittlebug *Philaenus spumarius* (L.) (Homoptera: Aphrophoridae). *Entomologist*, 107(1), 46–51.
- Yang, S., Logan, J., & Coffey, D. L. (1995). Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(1–2), 61–74. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02185-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02185-M)
- Yurtsever, S. (2000). On the polymorphic meadow spittlebug, *Philaenus spumarius* (L.) (Homoptera: Cercopidae). *Turkish Journal of Zoology*, 24(4), 447–459.
- Zajac, M. A., Hall, F. R., & Wilsons, M. C. (1989). Heat Unit Model for the Development of Meadow Spittlebug (Homoptera: Cercopidae) on Strawberry. *Environmental Entomology*, 18(3), 347–350.
- Zajac, Mark A., & Wilson, M. C. (1984). The effects of nymphal feeding by the meadow spittlebug, *Philaenus spumarius* (L.) on strawberry yield and quality. *Crop Protection*, 3(2), 167–175. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(84\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0261-2194(84)90051-6)

CAPITOLO 9 – “TARATURA.SNAP”: UN APPLICATIVO PER LA REGOLAZIONE STRUMENTALE DELLE IRRORATRICI

Considerando che più del 25% della produzione agricola mondiale viene distrutta, inquinata, o subisce l'antagonismo di parassiti animali o vegetali (Savi, 1996), risulta evidente che i trattamenti fitosanitari costituiscono una delle fasi cruciali ma, al contempo, più complesse dell'intero processo produttivo agricolo. Fra le varie problematiche legate all'impiego dei prodotti fitosanitari, la qualità della distribuzione in campo costituisce un aspetto chiave, a cui spesso non viene dedicata la dovuta attenzione (Gil & Escolà, 2009; Balsari et al., 2010; Matthews & Roy, 2016).

E' indubbio che un uso efficiente dei prodotti fitosanitari, permettendo il controllo dei parassiti delle piante, permette un aumento della resa dei raccolti, migliorando in maniera significativa la quantità e la qualità delle colture (Gil et al., 2014). Tuttavia, l'inefficienza delle attrezzature di distribuzione in questa fase così delicata può avere ripercussioni sia sulla salute umana che sull'ambiente (Damalas & Eleftherohorinos, 2011; Ahmad et al., 2020).

Diverse indagini di campo, infatti, riportano perdite tra il 30% e il 60% del prodotto distribuito per sgocciolamento a terra o per deriva (Russu & Vieri, 2003). Ciò determina perdite economiche dirette dovute al costo del prodotto che non raggiunge il *target* e al costo della distribuzione, come pure perdite indirette legate al minore controllo degli organismi bersaglio, nonché un maggior impatto sulla salute umana e sull'ambiente.

Una migliore distribuzione dei prodotti fitosanitari rende pertanto la difesa non solo più efficace ma anche più sostenibile.

Un trattamento può dirsi efficace se vengono controllati alcuni specifici fattori tecnico economici. Tra questi i più importanti sono: tempestività, massima copertura, massima uniformità, buona penetrazione, corretto deposito, minimizzazione delle perdite e delle dispersioni (Russu & Vieri, 2003).

La verifica dell'efficienza distributiva delle macchine irroratrici operanti in agricoltura assume quindi un'importanza basilare per la realizzazione di obiettivi legati alla tutela ambientale, alla salubrità delle produzioni agricole, alla salvaguardia degli operatori agricoli e al raggiungimento dei fattori tecnico economici sopra descritti. Pertanto, la realizzazione di una

moderna agricoltura capace di integrarsi con l'ambiente e di fornire al consumatore un prodotto sano, non può prescindere dalla realizzazione di un servizio per la taratura e la verifica dell'efficienza distributiva delle macchine operanti in agricoltura. Le principali cause di una scarsa qualità della distribuzione sono, infatti, la scarsa manutenzione delle attrezzature e la mancata o carente regolazione strumentale (Balsari et al., 2010).

Per questo motivo la Direttiva 128/2009 sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari, attuata attraverso il Piano d'Azione Nazionale (PAN), prevedeva l'obbligo del controllo funzionale delle attrezzature presso centri autorizzati e consiglia fortemente la taratura (o regolazione strumentale) delle irroratrici da parte delle aziende agricole. Sulla stessa linea sembrerebbe indirizzata la nuova agenda Pac dei Paesi comunitari per gli anni 2023-2027.

La regolazione strumentale delle irroratrici dovrebbe essere realizzata direttamente dall'agricoltore in base alla realtà aziendale e alla specifica tipologia d'intervento, sulla base della coltura, della fase fenologica, dell'organismo bersaglio e del tipo di prodotto fitosanitario, tenendo conto dei principali parametri operativi, quali velocità di avanzamento, pressione di esercizio, numero e tipologia degli ugelli e loro portata, volume di distribuzione e portata del ventilatore.

Le operazioni di taratura possono quindi risultare complesse, e questa complessità è probabilmente una delle cause che spingono gli agricoltori a trascurare la taratura delle irroratrici prima della distribuzione del prodotto in campo.

9.1 Obiettivi della ricerca

Le nuove tecnologie informatiche possono certamente aiutare gli agricoltori ad eseguire in modo rapido ed efficace la regolazione strumentale delle attrezzature direttamente in azienda e/o in campo, rendendo l'operazione meno complessa.

L'assenza in *olivo.net* di un sistema a supporto dell'importante fase decisionale (operativa) in questo campo, tenuto conto il contesto in cui tale fase si realizza, mi ha spinto ad affrontare con il mio Dottorato un ulteriore obiettivo volto a rispondere a questa necessità.

Finalità di questa attività di ricerca è stata quella di sviluppare e testare un'applicazione nativa per dispositivi mobili, in grado di operare anche *off-line*, in grado di supportare e guidare l'utente durante le principali fasi della taratura dell'irroratrice e dell'esecuzione del trattamento, in modo semplice e veloce, fornendo una lettura immediata dei parametri necessari a configurare l'attrezzatura e facilmente impiegabile per tutte le macchine che montano ugelli (irroratrici idrauliche "a barra" e atomizzatori).

L'ulteriore scopo di questa attività è stato inoltre quello di mettere a sistema e rendere facilmente fruibili sia tutte quelle conoscenze scientifiche che, in vari studi e prove applicative, hanno consentito riduzioni dei volumi d'acqua del 30-40% e dei prodotti fitosanitari del 20-50% per la coltura della vite (Gil & Escolà, 2009; Gil et al., 2013; Viret et al., 2007; Viret et al., 2010), come pure diminuzioni significative dei mezzi tecnici anche per pomacee (Sutton & Unrath, 1984), drupacee (Rüegg et al., 1999) e olivo (Miranda-Fuentes et al., 2016) e sia i diversi Framework definiti dalle Direttive sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari (European Parliament, 2009b), sull'utilizzo delle acque (European Parliament, 2000) e sull'utilizzo delle macchine per i trattamenti (European Parliament, 2009a).

Infine, lo strumento aspira ad essere utilizzato come mezzo educativo da parte dei consulenti. In questo processo dovrebbero essere evidenziati i principali fattori di rischio per consentire all'utente di comprendere la natura del problema e riconoscere la relazione tra i fattori di rischio e la deriva dell'irrorazione, fornendo i suggerimenti sulle misure di mitigazione della deriva e indicazioni immediate e facilmente interpretabili sulla loro efficacia.

9.2 Materiali e Metodi

9.2.1 Ricerca della letteratura di riferimento

Un'accurata analisi della letteratura sul tema è stata sviluppata sugli ambiti conoscitivi rilevanti per il raggiungimento degli obiettivi e la realizzazione dell'applicazione e più nel dettaglio: i) definizione dell'architettura e della struttura dell'applicativo, ii) *framework* normativo nazionale riguardante la regolazione strumentale; iii) tecniche di distribuzione dei prodotti fitosanitari; iv) regolazione strumentale delle attrezzature sulle colture di maggiore rilevanza in Italia; v) principali parametri di distribuzione, *range* di valori ottimali necessari per le corrette operazioni di taratura e relativi metodi di calcolo; vi) influenza delle variabili meteorologiche rispetto al fenomeno della deriva del trattamento. È stata inoltre condotta una ricerca bibliografica approfondita sulle applicazioni disponibili sul mercato che si proponevano analoghi obiettivi.

La ricerca della letteratura è stata effettuata nelle banche dati bibliografiche digitali *Scopus* (<https://www.scopus.com>), *Web of Science* (<https://apps.webofknowledge.com>) e *Google Scholar* (<https://scholar.google.it>), conclusa il 1° gennaio 2020.

Per essere presi in considerazione, gli articoli dovevano soddisfare i seguenti criteri: i) essere scritti in inglese o italiano; ii) essere pubblicati su riviste, atti o in altre forme, compresi rapporti

o siti web; iii) essere pubblicati da parte di enti riconosciuti o altre autorità competenti del settore.

Sulla base di questi criteri, sono state formulate *query* specifiche per la ricerca di articoli accademici, recensioni, articoli in stampa e documenti di conferenze nei tre database bibliografici digitali. La ricerca è stata limitata a titoli, *abstract* e parole chiave.

9.2.2 Design e definizione dell'architettura dell'applicazione

Il cuore della difesa integrata, come dettagliatamente descritto nel capitolo quarto, risiede nel processo decisionale. Dopo aver affrontato le decisioni strategiche e tattiche in merito alla difesa, l'agricoltore o il tecnico si trovano a dover affrontare le decisioni operative che riguardano la corretta applicazione delle misure di controllo. In questo ultimo passaggio della catena decisionale vi sono quelle decisioni che avvengono poco prima dell'intervento o legate strettamente all'intervento, tra queste è importante ricordare la corretta e completa taratura degli atomizzatori, la regolazione della velocità di avanzamento, la regolazione dei flussi d'acqua dell'intervento (Caffi et al., 2016).

Tanto più queste decisioni saranno supportate da una base di informazioni approfondita, tanto più verrà razionalizzato l'intervento con conseguente risparmio economico ed ambientale.

Per questo motivo, il focus di questa attività di ricerca è stato posto proprio su queste attività operative che riguardano la messa in atto del trattamento e la scelta dei parametri di lavoro dell'irroratrice, andando ad individuare tre fondamentali aspetti: le potenziali utenze e il loro ruolo nella gestione aziendale; il contesto in cui vengono prese tali decisioni; le relative necessità e criticità durante l'attività.

Per delineare l'ambito, la struttura e la forma dell'app, dopo aver definito le ipotesi, sono stati identificati i principali obiettivi progettuali e le domande fondamentali volte a definire i punti precedentemente riportati, secondo l'analisi di sistema (Leffelaar & Ferrari, 1989; Rossi et al., 2010) e andando, *in primis*, a definire l'utenza *target* che avrebbe tratto vantaggio dall'uso di questa nuova tecnologia.

Il processo decisionale legato alla taratura viene svolto da tecnici di campo (Gil, Campos, Ortega, Llop, Gras, Armengol, Salcedo, & Gallar, 2019), che generalmente mostrano una scarsa propensione all'adozione delle nuove tecnologie, pochi minuti prima dell'operazione. Per questo motivo, e a causa dell'elevata complessità e dei numerosi fattori da considerare, il processo viene spesso sottovalutato (Magarey et al., 2002; Rossi et al., 2012).

Per questo l'applicazione *software* è stata concepita per l'utilizzo da dispositivi mobili (*Smartphone e Tablet*), sia *Android* che *iOS*, utilizzabili pertanto anche in pieno campo, sia in

fase di consultazione che di inserimento dati. Inoltre, per far fronte all'assenza di copertura di rete o presenza di banda larga o ultra larga in pieno campo nella maggior parte delle aree rurali, anche conosciuta con il termine di “*digital divide*” e che rende difficoltoso l'utilizzo di “*web application*” (D'Alicandro, 2020; Europos Komisija, 2021), è stata reputata idonea una soluzione nativa e “*Offline-first mobile app*” (Jobe, 2013; Ahmadzadegan et al., 2020). Le app native hanno infatti la capacità di: i) funzionare anche *offline*, appoggiandosi a *dataset* presenti nella memoria dell'applicativo; ii) utilizzare il massimo delle capacità dell'applicativo, mantenendo l'accesso a tutte le funzionalità del dispositivo e la capacità di interagire con tutti i *features*; iii) essere molto più veloci, efficienti e facili da utilizzare rispetto ad altre app, offrendo una migliore *user experience*. Per l'app, non sono state previste notifiche *push* né integrazioni *social*.

Il mercato *target* individuato è stato quello italiano per due principali motivazioni: *in primis*, per limitare e definire in maniera univoca il *framework* normativo relativo alla regolazione strumentale, secondariamente per definire il numero di colture (oltre all'olivo) da prendere in considerazione. L'estensione dell'applicazione ad altre nazioni dovrà prevedere pertanto una prima analisi delle principali norme nazionali e locali, secondariamente uno studio relativo alla gestione fitoiatrica delle colture presenti nel territorio e infine la traduzione dei testi *Frontend* dell'app.

Si è deciso di sviluppare l'applicazione con un'architettura a micro-servizi, sistema che permette di realizzare un'infrastruttura altamente scalabile e modulare, a cui potranno essere aggiunti e rimossi componenti in modo da implementare nuove funzionalità. Al contempo tale struttura garantisce fluidità nella navigazione e nell'utilizzo delle funzioni.

A differenza della classica architettura di tipo monolitico, dove un applicativo *web* è sviluppato e distribuito come un'unica entità, le funzionalità svolte dall'applicazione vengono divise in diversi servizi ognuno implementato e distribuito separatamente dagli altri (Villamizar et al., 2015; Alshuqayran et al., 2016; Levi, 2019).

L'applicazione, battezzata taratura. snap, è strutturata in diverse macro-funzionalità correlate (Figura 1), così suddivise:

- a. determinazione del volume di acqua ottimale in funzione della chioma/coltura da trattare;
- b. determinazione e calibrazione dei parametri ottimali di esercizio;

- c. determinazione dell'applicabilità dei trattamenti sulla base dei parametri climatici inseriti dall'utente. Il sistema è in grado di indicare se vi sono o meno le condizioni ottimali per la distribuzione;
- d. verifica del trattamento. L'utente può verificare se il trattamento è stato distribuito correttamente.

Sulla base dell'architettura e degli obiettivi dell'app, è stata definita la sequenza di visualizzazione delle funzioni presenti. Il sistema è stato pensato per presentare messaggi di avvertimento volti a evitare la selezione di valori dei parametri (velocità di avanzamento, pressione di lavoro, numero di ugelli, ecc.) non conformi a quelli raccomandati dalle migliori pratiche di gestione (Gil et al., 2013).

9.2.3 Determinazione dei parametri d'esercizio

Un'adeguata conoscenza della relazione tra i parametri operativi (volume di miscela distribuita, pressione di lavoro, velocità di avanzamento, schema di irrorazione, ecc.), la specie e le caratteristiche della coltura (morfologia, struttura, sviluppo, ecc.) porterà al miglioramento della qualità del processo di irrorazione. Uno degli aspetti su cui questi parametri hanno maggiore influenza è la definizione del volume di acqua d'irrorazione adeguata a ogni trattamento. Il primo passo fatto è stato definire due distinti percorsi di determinazione del volume d'irrorazione, uno per le colture arboree e l'altro per quelle erbacee.

Il principio utilizzato da taratura.snap per la determinazione del volume ottimale di acqua da distribuire sulle colture arboree si basa su fattori dimensionali legati alla struttura della chioma (Byers et al., 1971; Gil, 2001; Gil & Escolà, 2009; Balsari et al., 2010), e più precisamente sul *Tree Row Volume (TRV)*, una modificazione dell'area della parete fogliare, *Leaf Wall Area (LWA)* proposta dall'EPPO (EPPO, 2021). Il metodo *LWA* convenzionale, infatti, non considera parametri come la larghezza della chioma e la densità fogliare, che influiscono direttamente sulla qualità della distribuzione dell'irrorazione. Tuttavia, i depositi fogliari in punti diversi della chioma sono direttamente influenzati dalle caratteristiche di quest'ultima, principalmente altezza e profondità (Pergher & Zucchiatti, 2018). Tale metodo permette di prendere in considerazione questi parametri, ottenendo un valore raccomandato e armonizzato per l'espressione del volume di distribuzione in colture con una parete tridimensionale, testato in diverse condizioni (Friessleben et al., 2007; Toews & Friessleben, 2012). Per la determinazione delle dimensioni della vegetazione di colture arboree allevate a parete ed espresse in metri cubi per ettaro, come rappresentato in figura 1 e coerentemente con quanto riportato da (Fonte ENAMA), è stata utilizzata la seguente equazione (1):

$$Vv = \frac{H \times C \times 10000}{S} \quad (1)$$

dove: Vv rappresenta il volume della vegetazione, H rappresenta l'altezza della chioma in metri, C rappresenta la larghezza della chioma in metri e S l'interfilare in metri.

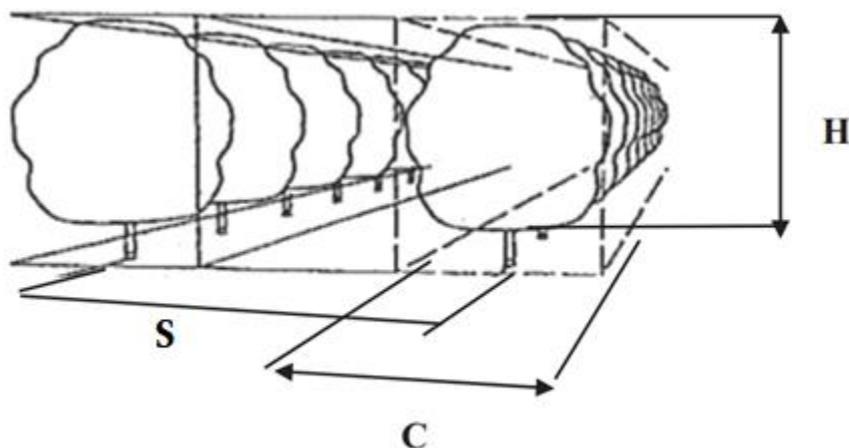


Figura 27: Rappresentazione grafica del calcolo del Tree Row Volume (Da: (Balsari et al., 2010))

Il volume teorico di distribuzione (Vt), calcolato in litri per ettaro, viene poi definito con l'applicazione della seguente equazione (2):

$$Vt = \frac{IdV \times Vv}{1000} \quad (2)$$

dove IdV rappresenta l'Indice di Volume.

L' IdV presente all'interno di `taratura.snap`, rispetto a quanto tabulato da ENAMA (Balsari et al., 2010), è stato riferito, attraverso una ricerca bibliografica, alle principali colture arboree tenendo presente tre parametri: tipo di coltura; densità della chioma e caratteristiche del prodotto fitosanitario (sistemico o di copertura, fungicida o insetticida).

In particolare, sono stati reperiti dati per l'ottimizzazione dell'applicativo per le forme di allevamento in parete di actinidia, vite, drupacee, pomacee, agrumi e, ovviamente, olivo. e per le forme di allevamento in volume di olivo, agrumi e drupacee (Tabella 1).

Coltura	Indice di volume (l/m^3) valore medio	Bibliografia di riferimento
Vite	0,9	(Byers et al., 1971),(Viret et al., 2007),(Gil, Campos, Ortega, Llop, Gras, Armengol, Salcedo, & Gallart, 2019),(Gil & Escolà, 2009)
Drupacee	0,035	(Rüegg et al., 2001),(Rüegg et al., 1999),(Rüegg & Viret, 1999)
Pomacee	1,15	(Sutton & Unrath, 1984),(Unrath, 2002),(Sutton, 1988),(Manktelow & Praat, 1997)
Agrumi	0,85	(Garcer et al., 2017)
Olivo	1	(Miranda-Fuentes et al., 2016)

Tabella 8: Indici di volume (IdV) in litri per metro cubo di vegetazione relativi a colture diverse e bibliografia di riferimento.

Sulla base delle informazioni reperite da (EPPO, 2021), considerata la variabilità di forme di allevamento (doppia, a lira, a falda verticale, a falda orizzontale ecc.) che possono caratterizzare le varie colture, è stata redatta una guida orientativa in cui l'utente può individuare il modo di determinare le diverse misurazioni per la determinazione del TRV (*Tree Row Volume*). Tale guida, inserita nella funzionalità *Help* dell'applicazione, servirà infatti a guidare l'utente nel calcolo del TRV sulla base del tipo di parete presente nell'impianto arboreo preso in considerazione.

In merito al calcolo del volume di distribuzione per le colture erbacee è stata utilizzata come riferimento la tabella 2, fornita da ENAMA (Balsari et al., 2010) per la determinazione dei volumi di distribuzione minima e massima su diverse colture.

Tipo di coltura	Trattamento diserbante (l/ha)		Trattamento fungicida o insetticida (l/ha)*	
	Massimo**	Consigliato	Massimo**	Consigliato
Cereali vernini	400	150-250	500	300
Mais, girasole, sorgo	500	Pre=150-250 Post=300-400	600	400-500
Riso	400	150-300	600	250-300
Pomodoro, patata	500	300	1000	600-700
Barbabietola	400	Pre=150 Post=300	700	300-400

Tabella 9: Volumi di distribuzione in litri per ettaro riferiti a diverse colture erbacee. * i volumi sono riferiti al massimo sviluppo vegetativo. ** non è consentito superare il volume massimo per ettaro indicato in etichetta (Da: ENAMA)

Definito il volume di acqua da distribuire si è proceduto al calcolo degli ulteriori parametri d'esercizio attraverso la seconda funzionalità di seguito descritta.

Sulla base di quanto descritto precedentemente e in conformità alle *Best Management Practices (BMP)* (Gil, Gallart, et al., 2013), l'applicativo permette di definire i parametri ottimali da adottare per garantire un'applicazione razionale, attraverso le equazioni (3), (4) e (5):

$$V_l = \frac{q \times 600 \times n}{v \times d} \quad (4)$$

$$q = \frac{v \times d \times V_l}{600 \times n} \quad (5)$$

$$v = \frac{q \times 600 \times n}{V_l \times d} \quad (6)$$

dove: V_l è il volume (l/ha) effettivamente distribuito; q è la portata media degli ugelli (l/min); v è la velocità di avanzamento (km/h); d è la distanza tra gli ugelli sulla barra di distribuzione (m); n è il numero di ugelli o piastrine impiegati. Le equazioni (4,5,6) sono state definite sulla base delle pubblicazioni di Gil et al., 2019; Balsari et al., 2010 e di Syngenta, 2014b. In funzione del parametro di regolazione da calcolare e indicato dall'utente, l'applicazione adotterà una delle tre equazioni (4,5 o 6) e il lato *Frontend* presenterà tre diverse schermate riportanti diverse voci di *input*.

L'applicazione inoltre è in grado di determinare la pressione d'esercizio ottimale sulla base delle seguenti voci inquisite dall'utente (Baldoïn, 2008; Donati, 2018; Baldoïn, 2019): tipo di ugello o piastrina, classe dell'ugello o tipo di piastrina/convogliatore e numero di ugelli o piastrine impiegate.

A tal fine è stata condotta una ricerca sulle caratteristiche funzionali dei principali ugelli e piastrine oggi adottate dagli agricoltori (Donati, 2018; Baldoïn, 2019), ponendo particolare attenzione rispetto alle connesse relazioni tra pressione di esercizio e portata erogata (Tabella 3 e Tabella 4). Le informazioni d'interesse messe a disposizione dalle principali aziende produttrici (siti, cataloghi, schede tecniche, ecc.) e dall'organizzazione ISO (ISO 10625 (E), 2018) sono state digitalizzate con lo scopo di costituire i *dataset* necessari all'applicazione per svolgere correttamente i calcoli.

Sulla base dei risultati di tale ricerca sono state inserite all'interno dell'applicativo le seguenti classificazioni: 1) Ugelli ISO 10625 (ISO 10625 (E), 2018), (Tabella 3); 2) Ugelli Albuz ATR (Albuz, n.d.), (Tabella 4); 3) Piastre Albuz D15 (Albuz, n.d.); 4) Piastre Albuz D18 (Albuz, n.d.); 5) Piastre Albuz D30 (Albuz, n.d.); 6) Piastre Albuz AD+AC (Albuz, n.d.); 7) Piastre Albuz Inox (Albuz, n.d.); 8) Piastre TeeJet Cono vuoto (TeeJet, n.d.); 9) Piastre TeeJet Cono pieno (TeeJet, n.d.); 10) Piastre ASJ DC+NC (ASJ, n.d.); 11) Piastre ASJ DC15 (ASJ, n.d.); 12) Piastre ASJ DC18 (ASJ, n.d.); 13) Piastre ASJ DC30 (ASJ, n.d.).

Utilizzando tali *dataset*, il sistema calcola la pressione di lavoro richiesta per ottenere la portata desiderata con il numero e la dimensione degli ugelli precedentemente selezionati. Quando la pressione calcolata non rientra nell'intervallo di pressione consigliato per un particolare tipo di applicazione, sullo schermo appare un messaggio di avvertimento.

Ugelli ISO 10625		Pressione (bar)																								
Classe ugello	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
	Portata (l/min)																									
005 Blu-Lilla	0,12	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	
0067 Verde Oliva	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	
0075 Rosa chiaro	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	
01 Arancia	0,23	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	
015 Verde traffico	0,34	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	
02 Giallo di zinco	0,46	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	
025 Viola	0,58	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	
03 Blu genziana	0,68	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	
035 Rosso Porpora	0,8	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,6						
04 Rosso fiamma	0,91	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	
05 Marrone	1,14	1,6	2,0	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,7	3,8	4,0	4,2	4,3	4,5	4,6	4,8	4,9	5,0	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,8	
06 Grigio segnale	1,37	1,9	2,4	2,8	3,1	3,4	3,7	3,9	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,2	6,4	6,5	6,7	6,8	6,9	
08 Bianco traffico	1,8	2,6	3,2	3,7	4,1	4,5	4,9	5,2	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7	6,9	7,2	7,4	7,6	7,8	8,1	8,3	8,5	8,7	8,9	9,1	9,2	
010 Azzurro chiaro	2,3	3,3	4,0	4,6	5,2	5,7	6,1	6,5	6,9	7,3	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,3	10,6	10,8	11,1	11,3	11,6	

Tabella 10: Portata (litri/minuto) in funzione di diverse pressioni di esercizio degli ugelli appartenenti alla classificazione ISO 10625

Ugelli Albuz ATR		Pressione (bar)																								
Classe ugello	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
	Portata (l/min)																									
Bianco	0,22	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,50	0,51	0,52	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58			
Lilla	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,50	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61	0,63	0,64	0,66	0,68	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76	0,77			
Marrone	0,38	0,43	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,67	0,70	0,73	0,76	0,79	0,81	0,84	0,86	0,89	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,02	1,04			
Giallo	0,57	0,65	0,73	0,80	0,86	0,92	0,97	1,03	1,07	1,12	1,17	1,21	1,25	1,29	1,33	1,37	1,40	1,44	1,48	1,51	1,54	1,58	1,61			
Arancio	0,77	0,89	0,99	1,08	1,17	1,24	1,32	1,39	1,45	1,51	1,57	1,63	1,69	1,74	1,79	1,84	1,89	1,94	1,99	2,03	2,07	2,12	2,16			
Rosso	1,08	1,24	1,38	1,51	1,62	1,73	1,83	1,92	2,01	2,09	2,17	2,25	2,33	2,40	2,47	2,54	2,60	2,67	2,73	2,79	2,85	2,91	2,97			
Grigio	1,18	1,35	1,50	1,63	1,76	1,87	1,98	2,08	2,17	2,26	2,35	2,43	2,51	2,59	2,67	2,74	2,81	2,88	2,95	3,01	3,07	3,14	3,20			
Verde	1,40	1,60	1,78	1,94	2,09	2,22	2,35	2,47	2,58	2,69	2,79	2,89	2,99	3,08	3,17	3,25	3,34	3,42	3,50	3,57	3,65	3,72	3,80			
Nero	1,57	1,80	2,00	2,18	2,35	2,50	2,64	2,78	2,90	3,03	3,14	3,26	3,36	3,47	3,57	3,67	3,76	3,85	3,94	4,03	4,12	4,20	4,28			
Blu	1,92	2,20	2,45	2,67	2,87	3,06	3,24	3,40	3,56	3,71	3,85	3,99	4,12	4,25	4,37	4,49	4,61	4,72	4,84	4,94	5,05	5,15	5,25			

Tabella 11: Portata (litri/minuto) in funzione di diverse pressioni di esercizio degli ugelli Albuz ATR.

9.2.4 Individuazione delle condizioni dell'applicabilità del trattamento

Per effetto deriva si intende quel fenomeno per cui parte della miscela distribuita in campo viene proiettata al di fuori dell'area del trattamento. Tra le categorie di fattori che devono essere considerati per limitare tale effetto vi sono non solo la gestione dello spray, la tipologia di

attrezzatura e il corretto utilizzo dell'irroratrice, ma anche le condizioni metereologiche, in particolare la velocità del vento (m/s), la temperatura (°C) e l'umidità dell'aria (%) (ISO 22866, 2005). La definizione di tali limiti in taratura.snap è stata fatta andando ad individuare, attraverso la ricerca, nella letteratura scientifica di riferimento dei valori delle singole variabili oltre i quali l'effetto deriva diviene significativamente rilevante (Balsari et al., 2013; Nuyttens et al., 2006).

Quando si effettua un trattamento è bene che il vento sia assente, o quantomeno che la velocità non sia superiore a 3,0 m/s e contestualmente che le temperature non siano superiori a 25°C e l'umidità relativa dell'aria sia superiore al 60 % (Norbody & Skurterud, 1974; Phillips & Miller, 1999; Nuyttens et al., 2006; De Schampheleire et al., 2008; Balsari et al., 2013).

Pertanto, per verificare che vi siano le condizioni meteorologiche idonee al trattamento il sistema verifica che i dati inseriti dall'utente si trovino all'interno della soglia di accettabilità per le tre variabili.

Per tener conto dell'importante correlazione tra temperatura (T) e umidità relativa (UR) nella definizione della deriva, sono stati definiti diversi intervalli per ciascuna delle variabili a cui è stato attribuito un diverso Indice Rischio Deriva (IRD). L'IRD è stato determinato sulla base dei dati reperiti dalle pubblicazioni (Kaul et al., 2004; Nuyttens et al., 2006; De Schampheleire et al., 2008; Baetens et al., 2009).

	IRD	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	1,5	1,5	0	0	0
IRD	$\frac{T}{UR}$	<5	5	<10	10	15	17,5	20	>20	22,5	25	>25	30	>30	32,5	35
4	>85	4	8	8	12	12	12	12	8	8	8	6	6	0	0	0
3	85	3	6	6	9	9	9	9	6	6	6	4,5	4,5	0	0	0
3	80	3	6	6	9	9	9	9	6	6	6	4,5	4,5	0	0	0
3	70	3	6	6	9	9	9	9	6	6	6	4,5	4,5	0	0	0
3	60	3	6	6	9	9	9	9	6	6	6	4,5	4,5	0	0	0
2	<60	2	4	4	6	6	6	6	4	4	4	3	3	0	0	0
2	50	2	4	4	6	6	6	6	4	4	4	3	3	0	0	0
2	40	2	4	4	6	6	6	6	4	4	4	3	3	0	0	0
2	35	2	4	4	6	6	6	6	4	4	4	3	3	0	0	0
1	<35	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	1,5	1,5	0	0	0
1	30	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	1,5	1,5	0	0	0
1	20	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	1,5	1,5	0	0	0
1	10	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	1,5	1,5	0	0	0

Tabella 12: Tavola a doppia entrata per la valutazione dell'Indice di rischio deriva complessivo calcolato attraverso il prodotto degli indici di rischio specifici relativi alle diverse umidità relative dell'aria (UR), e temperature (T), poste rispettivamente sulle colonne e sulle righe.

Attraverso una tabella a doppia entrata (Tabella 5), in cui nella prima colonna viene riportato l'IRD associato alle diverse classi di umidità relativa, e nella prima riga l'IRD associato ai diversi valori della temperatura, viene determinato l'IRD (IRD T x IRD UR) finale. Tale prodotto definisce se vi siano le condizioni meteorologiche ottimali per il trattamento come mostrato in tabella 6. Per quanto riguarda invece la velocità del vento, si è scelto di adottare la

scala empirica di Beaufort. Secondo tale scala, con una velocità del vento superiore a 3 m/s, è possibile osservare il movimento delle foglie (ARPAE, n.d.)

IRD (TxUR)	OK/No	Output del sistema
12-9-6	OK	Condizioni per l'applicazione molto favorevoli
5	No	Condizioni per l'applicazione favorevoli
4,5-4	No	Condizioni per l'applicazione non favorevoli
3-2-1,5-1	No	Condizioni per l'applicazione sfavorevoli

Tabella 6: Condizioni di applicabilità dei trattamenti fitoiatrici in base all'indice di rischio deriva totale.

9.2.5 Verifica del trattamento

Alla fine del processo decisionale vi è un'ulteriore fase di grande importanza, ossia la valutazione dell'effettiva efficacia delle misure adottate. Tale attività, nonostante si trovi alla fine del percorso, ricopre un ruolo di fondamentale importanza in quanto, se effettuata sulla base di evidenze documentate permette di attuare un miglioramento continuo del processo (Caffi et al., 2016). La verifica dell'efficienza del trattamento e della qualità della distribuzione dei prodotti fitoiatrici è un aspetto fondamentale per conseguire un'ottimale efficacia biologica dell'intervento, sia come omogeneità e della regolarità della soluzione giunta sulla vegetazione, sia come minimizzazione degli effetti indesiderati sull'ambiente e sull'uomo.

Una metrica che può essere utilizzata per prevedere il successo di un'applicazione è il grado di contatto tra le gocce e la superficie del bersaglio (copertura dello spruzzo). Uno dei metodi più semplici per visualizzare la copertura è l'uso delle cartine idro sensibili, strisce rigide di cartoncino ricoperte da una speciale superficie gialla in grado di virare dal colore giallo al blu nel punto d'impatto di ogni goccia di soluzione irrorata, fornendo un'immediata indicazione sulla qualità della distribuzione, sul grado di penetrazione delle gocce, dell'uniformità della bagnatura ottenuta nelle porzioni della vegetazione in cui sono state posizionate le cartine (Syngenta, 2014b; Mosetti et al., 2019).

È stato dimostrato che le cartine idro sensibili rappresentano un valido metodo per valutare l'efficacia della distribuzione del prodotto e non presentano differenze significative rispetto alle foglie (Gil et al 2015).

Per questo motivo, tale metodo è stato scelto per la verifica della distribuzione da effettuarsi post- trattamento per evidenziarne i punti critici o migliorabili, attraverso il posizionamento strategico delle cartine sulla chioma bersaglio o sul terreno (Deveau, 2021).

Sulla base di ciò, per rendere possibile la verifica d'applicazione, sono state definite cinque classi di copertura, seguendo quanto riportato sui lavori di Mescalchin et al., 2011, Syngenta, 2014a e Mosetti et al., 2019).

Per ciascuna classe sono state associate immagini di cartine idro sensibili con uno specifico grado di copertura (Figura 2).

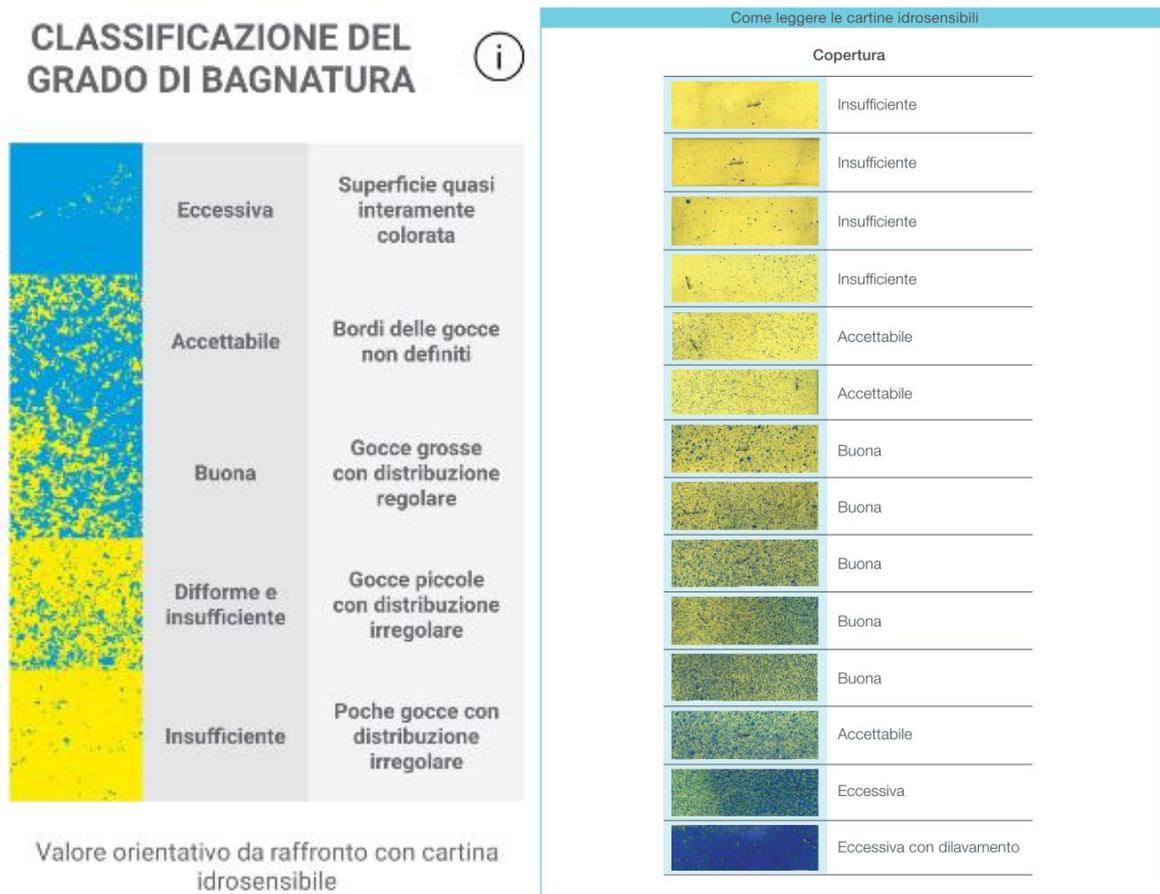


Figura 28: A sinistra sono riportate le classi del grado di bagnatura presenti nella funzione “verifica dell’applicazione”, a destra le classi del grado di bagnatura riportate nel “Quaderno: Agricoltura Responsabile (Da: Syngenta 2014).

Le classi di copertura individuate sono: i) eccessiva; ii) accettabile; iii) ottimale; iv) difforme/insufficiente; v) del tutto insufficiente. Questo permette all’utente di raffrontare visivamente le cartine adoperate durante la distribuzione svolta e poter verificare l’efficienza. Per ciascuna delle classi non ottimali di distribuzione sono state identificate le possibili cause e riportate nelle schede di approfondimento “Help” (vedi il paragrafo “Help”), con l’obiettivo di supportare l’operatore nella correzione delle criticità evidenziate, migliorando effettivamente la distribuzione. Infine, nella schermata principale di questa funzione, all’interno dell’“Help” sono state riportate indicazioni fondamentali anche su come collocare le cartine idro sensibili nella vegetazione distinguendo le colture arboree da quelle erbacee. Tali indicazioni sono state ricostruite seguendo protocolli e disegni sperimentali riportati nei principali articoli tecnici o scientifici relativi all’argomento (Syngenta, 2012; Esau et al., 2014; Mosetti et al., 2019; Deveau, 2016; Michael et al., 2020).

9.2.6 Archivio

La pianificazione e il raffronto sono due aspetti fondamentali per garantire un'ottimizzazione del trattamento.

Per questo motivo, è stata infine ipotizzata la realizzazione di un archivio per la gestione dei salvataggi delle operazioni condotte, allo scopo di confrontare le diverse regolazioni, lasciare uno storico e poter risalire rapidamente ai parametri ottimali individuati dall'app in consultazioni passate. Al termine del processo, viene generato un rapporto contenente le informazioni dettagliate che l'utente può salvare nell'archivio con la denominazione preferita.

9.2.7 Help

La sezione "Help", identificata dal simbolo ⓘ e presente in ogni schermata dell'app è stata ideata per supportare l'utente nella navigazione e nell'interpretazione delle voci e delle icone. In essa sono inserite una serie di schede di approfondimento e descrizione che sono state concettualizzate e realizzate, basandosi sull'approfondito lavoro di bibliografia svolto.

Tale integrazione è stata ritenuta opportuna non solo per far fronte ai *feedback* emersi dal primo gruppo di tester delle versioni α e β del software, ma anche per fronteggiare la bassa attitudine all'adozione della tecnologia da parte degli operatori del settore agrario, come evidenziato in diversi studi (Magarey et al., 2002; Rossi et al., 2012).

9.3 Risultati

L'utente che utilizza l'applicativo ha come prima visualizzazione quella dell'*Homepage* con le funzioni principali (Figura 3) ordinate secondo una sequenza che rispecchia la successione delle operazioni che l'operatore compie prima e dopo l'esecuzione di un trattamento. In particolare, funzioni sono:

- i) calcolo del volume di distribuzione;
- ii) taratura dell'irroratrice;
- iii) definizione dell'applicabilità del trattamento;
- iv) verifica della distribuzione;
- v) archivio digitale delle operazioni registrate.

Nelle diverse schermate della app l'utente viene supportato nella navigazione e nell'interpretazione delle voci e icone attraverso gli *Help*, sezioni di approfondimento e descrizione, identificabili, come detto, dal simbolo ⓘ (Figura 4).



Figura 3: Schermata iniziale del menu taratura.snap su smartphone dove sono visualizzati i diversi moduli indipendenti per il calcolo dei parametri d'applicazione (volume di distribuzione e taratura dell'irroratrice), il modulo per la valutazione dell'applicabilità del trattamento, la verifica della distribuzione, l'archivio e la funzione Info.



Figura 4: Schermate rappresentative della funzionalità "Help" presente in taratura.snap.

9.3.1 Volume di distribuzione

La prima funzione dell'elenco in *homepage* è quella finalizzata alla determinazione del volume ottimale d'irrorazione per la coltura d'interesse, passo fondamentale per garantire una copertura uniforme della superficie vegetale da trattare ed evitare il goccio. Il volume d'irrorazione riveste un ruolo molto importante. È stato dimostrato che l'applicazione della

quantità d'acqua corretta secondo l'architettura della chioma migliora notevolmente l'efficacia del trattamento (Mosetti et al., 2019) e determina una riduzione significativa dell'impatto ambientale e del costo operativo, anche del 50% rispetto a un'irrorazione al volume massimo consentito (Russu & Vieri, 2003).

Dopo aver scelto preliminarmente la tipologia di coltura da trattare e definite le caratteristiche dell'impianto (Figura 5), l'utente dovrà selezionare la tipologia di trattamento che intende svolgere nel caso di una coltura erbacea o la forma di allevamento specifica nel caso di una coltura arborea.

L'app restituirà un intervallo minimo e massimo del volume di distribuzione. Per le colture arboree, la quantità di acqua viene determinata attraverso il metodo del *Tree Row Volume (TRV)* e degli indici di volume. Il dato finale potrà essere salvato nell'archivio dell'applicazione e consultato successivamente.

Per le colture erbacee, l'utente dovrà indicare la specie da trattare e la tipologia d'intervento che vuole eseguire. Le tipologie di trattamento presenti sono: 1) Diserbante Pre-emergenza; 2) Diserbante Post-emergenza; 3) Fungicida/Battericida; 4) Acarida/Insetticida.

In entrambi i percorsi l'app restituirà un intervallo minimo e massimo del volume di distribuzione,

Di seguito verranno illustrati i dettagli della funzionalità *Help* e delle voci di input necessarie per il calcolo del volume di distribuzione per le diverse colture

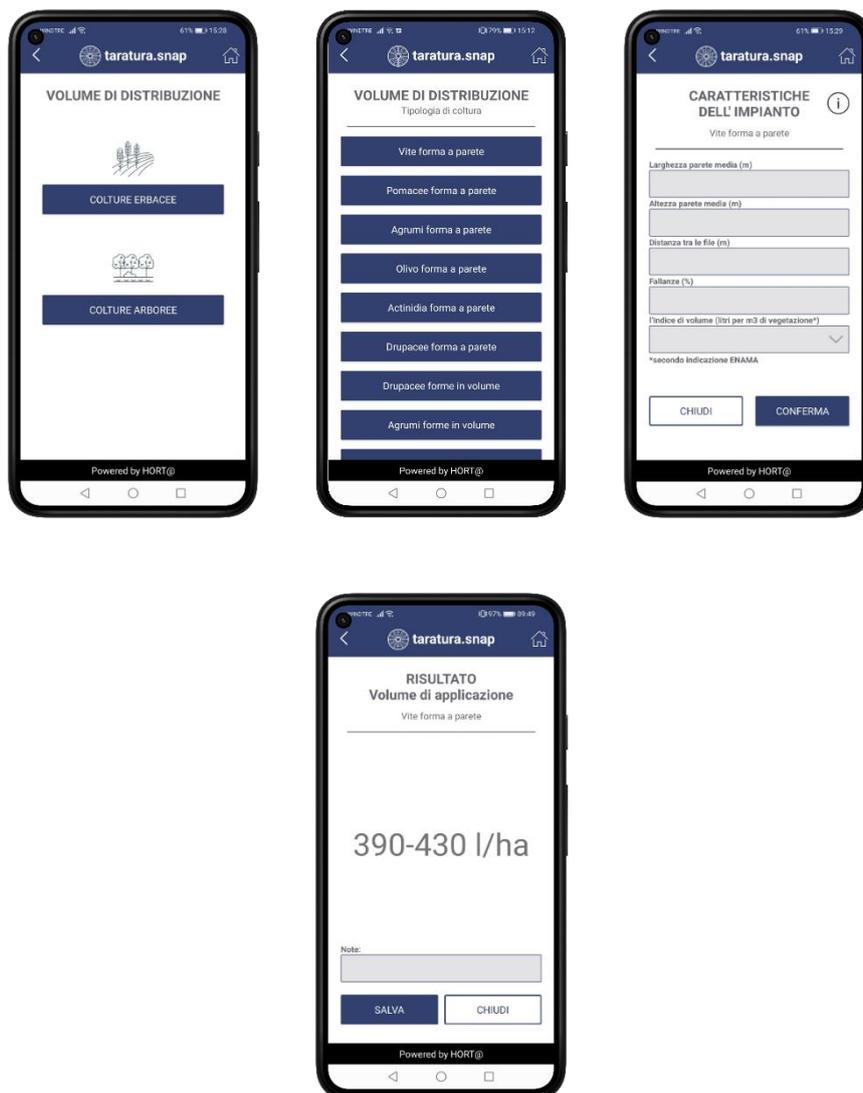


Figura 5: Schermate rappresentative del percorso di calcolo del volume di distribuzione. Dopo la scelta del tipo di coltura d'interesse e della forma di allevamento, l'utente procede all'inserimento delle caratteristiche d'impianto che, sulla base del Tree Row Volume, andranno ad indicare il volume di distribuzione ottimale in litri ettaro. A questo punto il dato può essere salvato nell'archivio e recuperato per un ripetuto utilizzo.

9.1.3.1 Forme a parete

Il volume della vegetazione per le colture arboree è determinato sulla base del metodo “Tree Row Volume” (TRV), calcolato a partire da alcuni parametri inseriti dall'utente.

Come accennato precedentemente, sulla base di quanto reperito in bibliografia è stato possibile ottimizzare l'applicativo per le forme di allevamento in parete di olivo, actinidia, agrumi, drupacee, pomacee e vite.

È importante considerare che, per le suddette colture, non è possibile individuare una sola tipologia di parete in quanto sul territorio italiano è presente un'enorme variabilità di forme e dimensioni. Tale variabilità di forme d'allevamento raggiunge la massima rappresentazione con la coltura della vite ma che, anche nelle altre colture, olivo compreso, non può essere tralasciata. A seguito di tale considerazione, è stato redatto un *Help* specifico (Figura 6) per fare in modo che l'app si adatti a diversi contesti e che l'utente sia guidato nella compilazione dei valori richiesti di larghezza media (L) e di altezza media (A) della parete, che dovranno essere determinati seguendo le indicazioni riportate in figura.

Tali valori, espressi in metri, non richiedono misurazioni specifiche per le forme a parete semplice (1 e 3) mentre per le forme a doppia parete, a Lyra, a V, a Y (2 e 4) o simili, la larghezza (L) dovrà essere pari alla somma delle singole larghezze delle rispettive pareti ($L = L1 + L2$).

Per le forme a tetto (5, 6, 7, 8 e 9) che presentano una parte della falda verticale e una orizzontale, la larghezza L dovrà essere ottenuta dalla media aritmetica di due o più misurazioni della porzione verticale e di quella orizzontale ($L = (L_A + L_n) / n$), mentre l'altezza (A) dovrà essere ottenuta dalla somma dell'altezza longitudinale della prima falda e dall'altezza longitudinale della seconda falda ($A = A1 + A2$) e misurando in corrispondenza l'asse longitudinale medio della chioma, come riportato nell'immagine.

I dati di questi due valori variano durante la stagione, in funzione della fase fenologica della coltura. Si è pertanto aggiunta l'indicazione di ripetere la misurazione durante la stagione in prossimità dei trattamenti fitosanitari.

La distanza tra le file, espressa in metri, dovrà essere determinata misurando la distanza tra le stesse, mentre nella voce fallanze l'utente dovrà riportare la percentuale di piante mancanti nell'impianto da trattare.

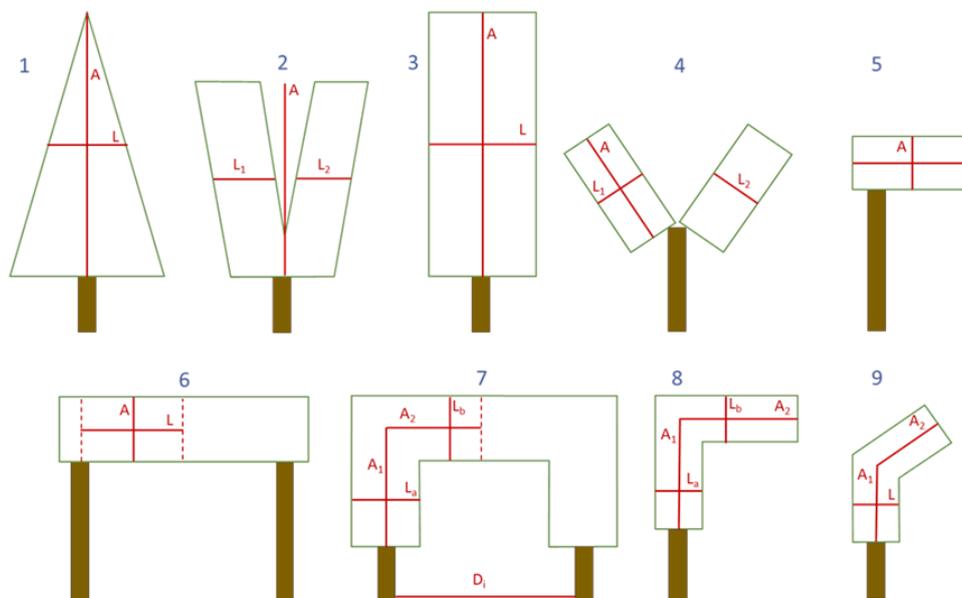


Figura 6 Schemi esemplificativi della modalità di misurazione dei parametri necessari per il calcolo del Tree Row Volume in colture arboree allevate a parete (Da: EPPO 2021).

Infine, dal menu a tendina l'utente dovrà selezionare il coefficiente "Indice di Volume", che converte i metri cubi di vegetazione in litri/ha di acqua da distribuire.

L'indice è correlato a tre parametri: il tipo di coltura; la densità della chioma; le caratteristiche del prodotto fitosanitario (sistemico o di copertura, fungicida o insetticida)

Il valore massimo (M) fa riferimento a chiome con densità elevate (scarsa penetrazione della luce all'interno della chioma) o per trattamenti fungicidi di copertura; il valore minimo (m) può essere utilizzato per chiome con ridotta densità fogliare, per trattamenti fungicidi con prodotti sistemici o con insetticidi (Figura 7).

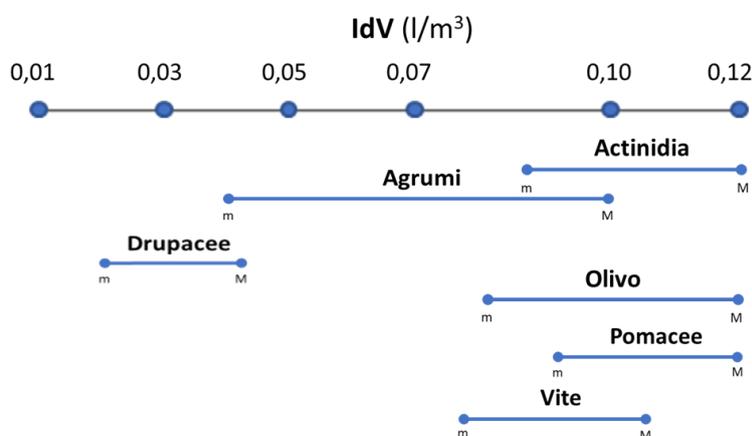


Figura 7: Range indicativo di IdV (l/m^3) per le colture arboree allevate con forma a parete.

9.1.3.2 Forme in volume

Allo stesso modo delle forme in parete anche per le forme in volume è stato utilizzato il *Tree Canopy Volume* (Silva Junior et al., 2016), ottimizzando poi l'applicativo sulla base della ricerca bibliografica per olivo, drupacee ed agrumi ed infine è stato predisposto un *Help* per guidare l'utente nella compilazione (Figura 8).

Il primo valore richiesto è il diametro, espresso in metri, della chioma (L), che dovrà essere determinato misurando la larghezza nella parte media della chioma, come riportato in figura 8. Il secondo valore da inserire è l'altezza media della chioma (A), espressa in metri, e che dovrà essere determinata misurando l'asse longitudinale medio della chioma.

Nel caso si riscontri una diffusa irregolarità della dimensione delle chiome nell'appezzamento oggetto del trattamento, sia per il diametro che per l'altezza si suggerisce di inserire la media aritmetica delle misurazioni su dieci piante scelte casualmente all'interno dell'appezzamento. Anche in questo caso viene suggerito all'utente di ripetere la misurazione in funzione della fase fenologica della coltura.

La distanza tra le file e la voce fallanze vengono compilate dall'utente allo stesso modo già indicato nel precedente paragrafo.

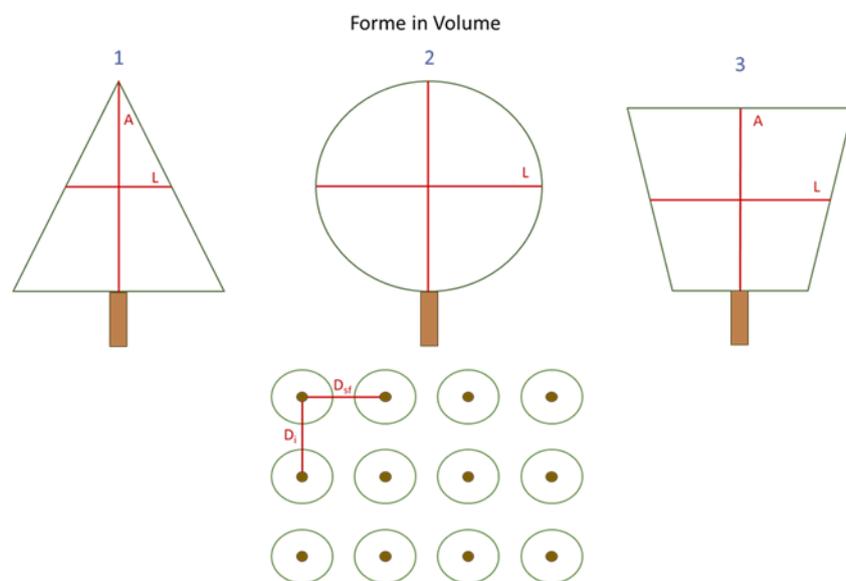


Figura 8: Variabili per la determinazione della parete della vegetazione nelle forme di allevamento in volume (Da: EPPO 2021).

Anche nel caso delle forme in volume all'utente è richiesto, come ultimo passo, l'inserimento da un menu a tendina di un "Indice di Volume" dove il valore massimo (M) fa riferimento a chiome con densità elevate (scarsa penetrazione della luce all'interno della chioma) o per trattamenti fungicidi di copertura; il valore minimo (m) può essere utilizzato per chiome con

ridotta densità fogliare, per trattamenti fungicidi con prodotti sistemici o con insetticidi (Figura 9).

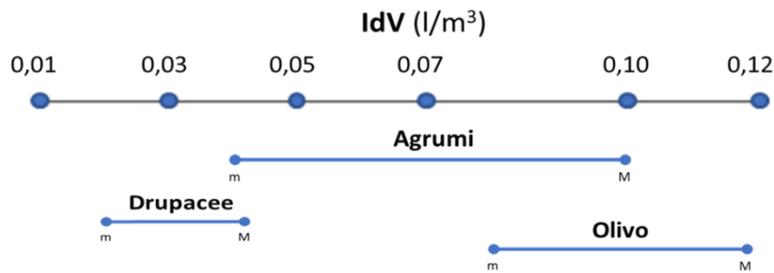


Figura 9: Range indicativo di IdV in l/m^3 per le colture arboree con forma di allevamento in volume.

9.3.2 Regolazione dello spray

Con questa funzione l'utente determina il settaggio dell'irroratrice più adatto per una specifica applicazione. La app, infatti, permette di selezionare irroratrici a barre per colture erbacee e atomizzatori da frutteto, come pure di selezionare gli ugelli o le piastrene e il modello di riferimento, scegliendo tra la classificazione ISO e quelle di altri tre costruttori: TeeJet, Albus e ASJ. Una volta inseriti di dati di *input* l'app restituisce quindi i valori di: i) pressione d'esercizio e portata; ii) pressione e velocità di avanzamento della trattatrice; iii) pressione e volume da distribuire (Figura 10 e Figura 11).

Per la determinazione di tali combinazioni di parametri, è richiesto l'inserimento attraverso un menu a tendina, del tipo di ugello o di piastrina utilizzati dall'utente scegliendo tra la classificazione Albus ATR, ISO 10625 e i principali modelli di piastrene e convogliatori presenti sul mercato.

Successivamente andrà inserito il numero di ugelli o piastrene utilizzati durante la distribuzione in campo e, a seconda dell'*output* desiderato, o la velocità di avanzamento in km/h, o la pressione di esercizio o il volume di distribuzione espresso in litri ettaro. Quest'ultimo parametro può essere determinato attraverso la funzione "volume di distribuzione" precedentemente descritta. Nel caso in cui l'utente operi con un atomizzatore in coltura arborea, un ulteriore parametro richiesto è la distanza tra le file espressa in metri, al contrario, nel caso in cui si tratti di una barra irroratrice per colture erbacee andrà inserita l'ampiezza di lavoro, ossia la lunghezza della barra espressa in metri.

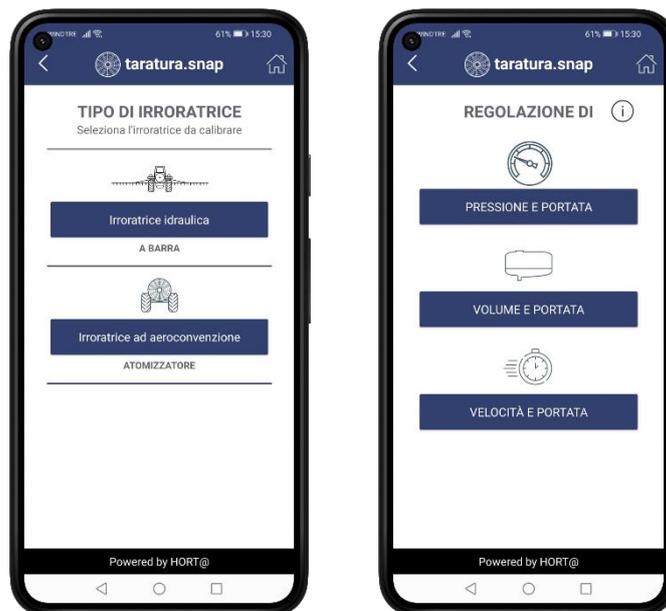


Figura 10: Schermate del modulo “Taratura dell’irroratrice”. A sinistra la schermata delle informazioni preliminari relative al tipo di irroratrice, a destra la schermata con le diverse combinazioni di parametri operativi per cui è possibile eseguire il calcolo

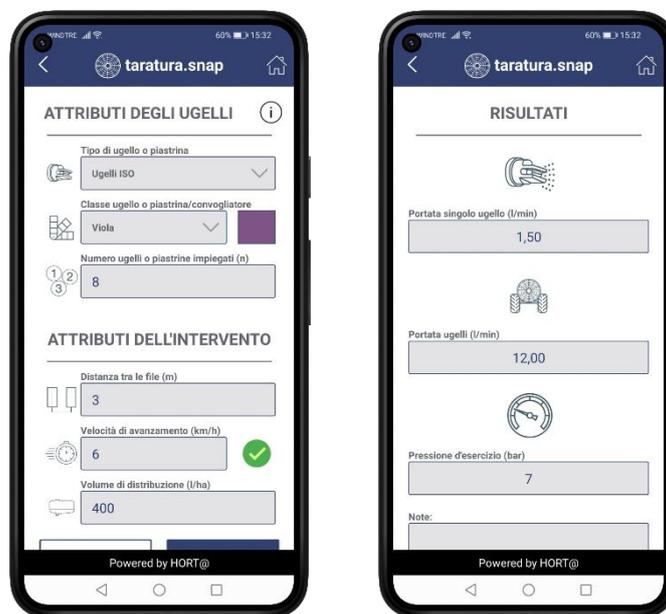


Figura 11: Schermate del modulo “Taratura dell’irroratrice”. A sinistra la scheda di inserimento dei dati di input e spunta di conferma della correttezza del dato. A destra output generati dall’applicazione

Al momento dell’inserimento di questi parametri tramite semplici barre con menu a tendina, la app mostrerà, sulla destra della barra, una icona di verifica della correttezza o meno dell’inserimento, mostrando rispettivamente i simboli “✓” o “✗” (Figura 11).

Il risultato del calcolo potrà essere salvato nell'archivio, permettendo all'utente di effettuare varie simulazioni allo scopo di individuare la combinazione più adatta di parametri operativi in rapporto alle esigenze di ogni specifica applicazione.

9.3.3 Applicabilità del trattamento

Questa funzione stabilisce se vi siano o meno le condizioni ambientali idonee per l'esecuzione del trattamento, sulla base della temperatura media (°C); dell'umidità relativa (%) e della velocità del vento (m/s) (Figura 12).

Le variabili metereologiche richieste possono essere determinate attraverso la consultazione delle previsioni o, meglio, misurate al momento dell'intervento direttamente in campo, attraverso stazioni meteo o semplici strumenti portatili da collegare al proprio smartphone. Anche in questo caso, l'inserimento è facilitato da menu a tendina, così da non richiedere la digitazione di valori numerici ed evitare i possibili errori connessi alla digitazione che, in condizioni operative non è sempre agevole.

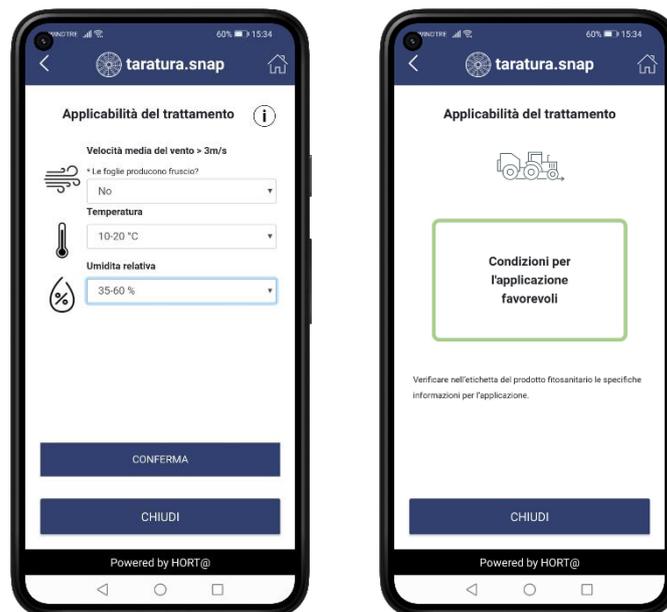


Figura 12: Schermate del modulo "Applicabilità del trattamento". A sinistra la schermata di inserimento dati, a destra l'output generato dall'applicazione

9.3.4 Verifica del trattamento

Le cartine idro sensibili sono strisce di carta in grado di virare dal colore giallo al blu nel punto d'impatto di ogni goccia di soluzione irrorata fornendo un'immediata indicazione sulla qualità

della distribuzione, del grado di penetrazione delle gocce, dell'uniformità della bagnatura ottenuta nelle porzioni della vegetazione in cui sono state posizionate le cartine

Questa funzione permette di valutare la qualità e l'omogeneità della distribuzione, attraverso il raffronto tra le classi di distribuzione riportate in un'apposita schermata e le cartine idro sensibili posizionate in campo secondo la guida costruita sulla base dei riferimenti bibliografici, presente nell'applicativo e di seguito riportata

Per quanto riguarda gli arboreti il numero minimo da posizionare è di ventiquattro cartine, distribuite per ambo i lati di erogazione. Per ogni lato devono essere individuate tre altezze della parete, superiore, mediana e inferiore e per ogni altezza si considerano due punti di osservazione (uno interno alla chioma e uno esterno), ciascuno con due cartine (una nella pagina superiore e una nella pagina inferiore della foglia) (Figura 13).

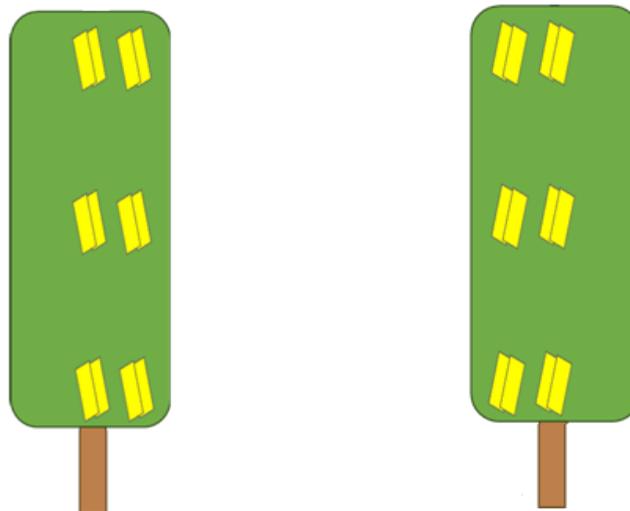


Figura 13: Schema di disposizione delle cartine idro sensibili riportato nella sezione Help per la verifica della distribuzione in un impianto arboreo.

Per le colture erbacee è necessario considerare almeno due aree rappresentative dell'appezzamento e, per ogni area, tre distinte altezze della coltura, distanziate di circa 30-80 cm, in funzione della specie vegetale e della fase fenologica. Ad esempio, sul frumento: estremità superiore (spiga), parte mediana (foglia a bandiera), estremità inferiore (terreno). Per ogni altezza si collocano due cartine (una per la parte superiore e/o lato destro dell'organo e una per la parte inferiore e/o lato sinistro dell'organo) come indicato in figura 14

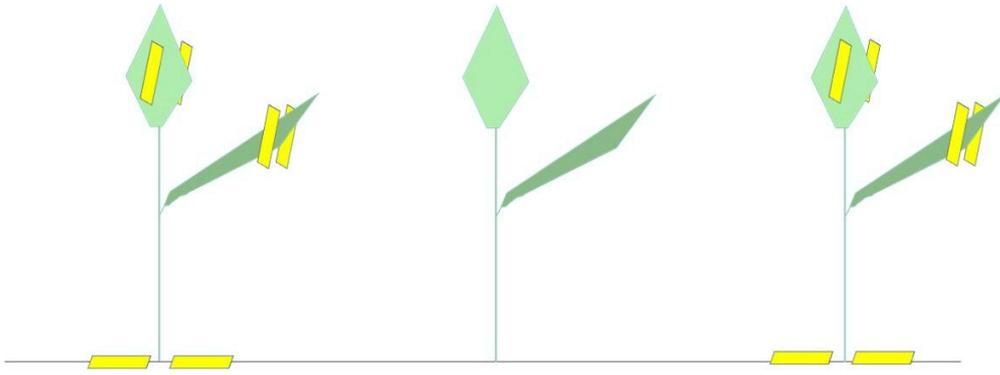


Figura 14: Schema di distribuzione delle cartine idro sensibili riportato nella sezione Help per la verifica della distribuzione su coltivazione erbacea.

L'operatore, dopo la distribuzione del prodotto fitosanitario potrà confrontare le sue cartine con quelle presenti nella scala in figura 15.

Una volta individuata la classe che più rappresenta il grado di distribuzione riscontrato sulle cartine e aver cliccato sulla rispettiva immagine, si accede a una scheda di approfondimento che consente di interpretare eventuali discrepanze fra la distribuzione attesa delle gocce e quella osservata e fornisce suggerimenti e consigli pratici per migliorare la distribuzione, reperiti dalla bibliografia

- a) *Grado di copertura eccessivo*: il rischio di perdite per gocciolamento e/o deriva è elevato, con una significativa perdita del prodotto e un conseguente impatto ambientale. La causa può essere un'eccessiva energia cinetica del flusso erogato. È pertanto opportuno: ridurre la pressione di esercizio; aumentare la velocità di avanzamento; ridurre la velocità del flusso d'aria.
- b) *Grado di copertura accettabile*: il grado di copertura è accettabile, ma viene comunque consigliato di ridurre la pressione di esercizio, aumentare la velocità di avanzamento, ridurre la velocità del flusso d'aria.
- c) *Grado di copertura ottimale*: il grado di copertura è ottimale e non occorre fare nulla: la distribuzione è uniforme e regolare (copre il 40 - 50% della superficie della cartina), le gocce sono medio/grandi (200-400 μm di diametro).
- d) *Grado di copertura insufficiente e difforme*, soprattutto per i prodotti di copertura che non penetrano e si redistribuiscono all'interno dei tessuti vegetali. Le superfici vegetali prive di deposito non sono protette, al di là delle capacità di redistribuzione superficiale del prodotto impiegato. La causa può essere una ridotta energia cinetica del flusso erogato. È pertanto opportuno: aumentare la pressione di esercizio; ridurre la velocità di avanzamento; aumentare la velocità del flusso d'aria. Nel caso in cui l'insufficiente

grado di copertura sia circoscritto ad alcune cartine idro sensibili, in specifiche aree della chioma, bisognerà verificare una o più delle possibili cause: usura e grado di pulizia degli effusori; orientamento degli effusori e grado di sovrapposizione dei coni di distribuzione; presenza di rotture o malfunzionamenti delle diverse parti della macchina; presenza, velocità e direzione del vento.

- e) *Grado di copertura del tutto insufficiente*: se le cartine che presentano questo grado di copertura sono posizionate all'interno della chioma (arboree) o nella parte bassa della coltura (erbacee), la causa può essere un'insufficiente energia cinetica del flusso erogato. Sarà pertanto opportuno verificare una o più delle seguenti possibili cause: pressione di esercizio (insufficiente); velocità del flusso d'aria (insufficiente); velocità di avanzamento (eccessiva). Se le cartine sono circoscritte ad alcune aree della chioma, verificare una o più delle possibili cause: usura e grado di pulizia degli effusori; orientamento degli effusori e grado di sovrapposizione dei coni di distribuzione; presenza di rotture o malfunzionamenti delle diverse parti della macchina; presenza, velocità e direzione del vento.

Viene inoltre consigliato di verificare anche la dimensione delle gocce: gocce molto piccole, ad esempio, indicano una pressione di esercizio eccessiva, con un alto rischio di deriva. È quindi opportuno ridurre la pressione e rimodulare i restanti parametri di regolazione.

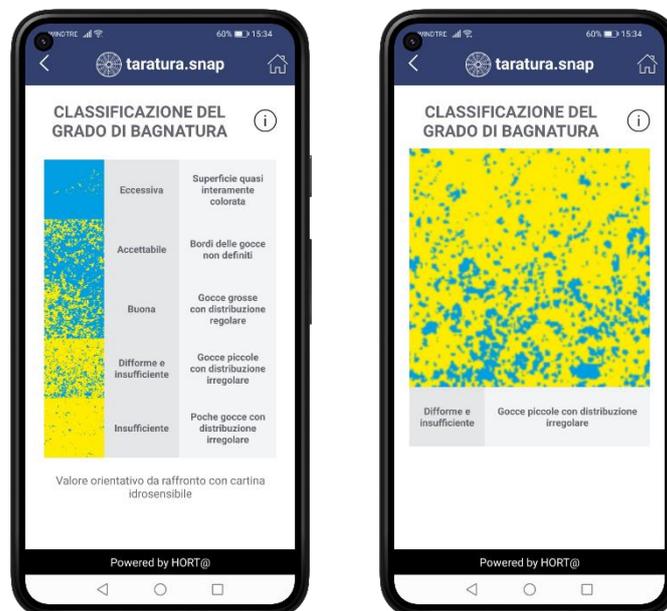


Figura 15: Schermate del modulo "Verifica dell'applicazione" presenti in taratura.snap. A destra, dettaglio della cartina esempio di una copertura "Difforme e insufficiente"

In ogni caso, quando dalla verifica della distribuzione della miscela fitosanitaria emerge un'anomalia riconducibile agli effusori od una parte di essi oppure più genericamente al malfunzionamento di un elemento dell'irroratrice, l'operatore dovrà rivolgersi ad un centro autorizzato al controllo strumentale.

9.3.5 Archivio

L'ultima funzione presente nell'applicazione è l'archivio digitale, sezione che permette di accedere a tutte le precedenti attività salvate dall'utente e classificate in ordine cronologico, sulla base di un titolo redatto dall'utente. È possibile, pertanto, riprendere e consultare le passate regolazioni, per poterle nuovamente adottare in situazioni analoghe.

9.4 Discussione e conclusioni

Dopo un lungo processo operativo, si è giunti a mettere a punto una app che risponde agli obiettivi prefissati. Essa è in grado di supportare e guidare l'utente in tutte le fasi necessarie per svolgere una corretta regolazione funzionale dell'irroratrice e una razionale esecuzione del trattamento, in modo semplice e veloce. Permette, infatti, di avere una lettura immediata dei parametri necessari a configurare la propria attrezzatura e può essere impiegata per tutte le macchine che montano ugelli, sia che si tratti di irroratrici idrauliche "a barra" che di atomizzatori.

L'app permette di mettere a sistema e rende facilmente fruibili tutte quelle conoscenze scientifiche che, in vari studi e prove applicative, hanno consentito riduzioni dei volumi d'acqua del 30-40% e dei prodotti fitosanitari del 20-50 % per la coltura della olivo (Gil & Escolà, 2009; Gil et al., 2013; Viret et al., 2007; Viret et al., 2010), come pure diminuzioni significative dei mezzi tecnici anche per pomacee (Sutton & Unrath, 1984), drupacee (Rüegg et al., 1999) e olivo (Miranda-Fuentes et al., 2016). Inoltre, nell'ambito della verifica della distribuzione, essa indica indirettamente anche quando macchine e ugelli necessitano di manutenzione.

Nel 2020 taratura.snap è stata testata, in differenti realtà aziendali e con diversi indirizzi colturali, nelle regioni Veneto, Emilia-Romagna, Lazio, Puglia, Sicilia. Il supporto e il riscontro fornito dai diversi tecnici hanno contribuito alla calibrazione e verifica dell'applicativo, permettendo di ottenere una valutazione "qualitativa" dell'app direttamente dall'utenza *target*. I *feedback* forniti dai tecnici sono riportati in figura 16.

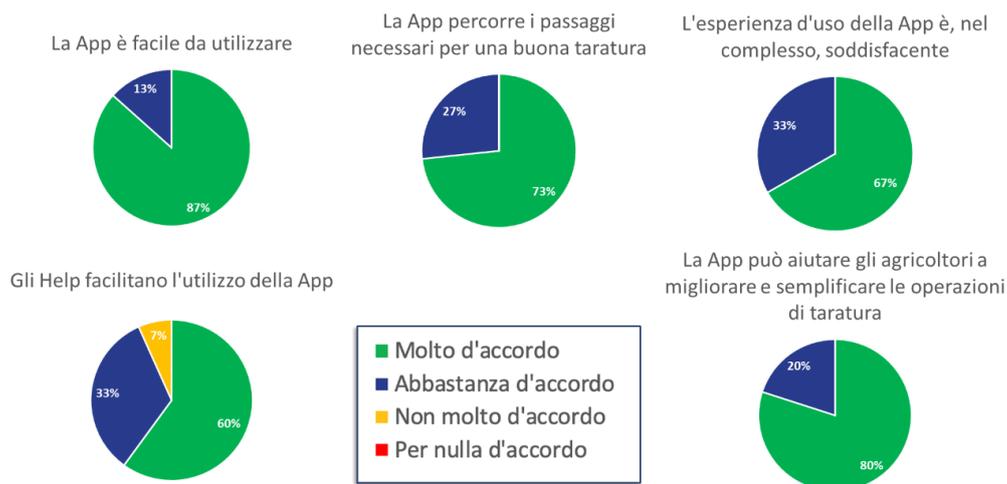


Figura 16: Feedback dei tecnici e degli agricoltori che hanno testato taratura.snap nel 2020 (Da: Anselmi e Legler, 2021).

In base a quanto emerso, un punto di forza dell'applicazione è il fatto che essa non è applicabile solo sull'olivo, nelle sue diverse forme di allevamento, ma anche a numerose altre colture, arboree ed erbacee. Su queste ultime l'app consente di scegliere tra nove colture e cinque diverse tipologie di trattamento, utilizzando valori tabulati aggiornati in conformità con le linee tecniche nazionali di difesa integrata. Per quanto riguarda le colture arboree, oltre all'olivo essa permette di considerare coltivazioni actinidia, agrumi, pomacee e drupacee, contemplando forme di allevamento sia in volume, sia a parete. Inserendo le caratteristiche dell'impianto, lo strumento calcola il volume della vegetazione, scegliendo tra 6 indici di volume proposti secondo la classificazione ENAMA (0,01 l/m³ ultra-basso, 0,12 l/m³ molto alto) e restituisce il volume d'acqua da distribuire per ettaro. I volumi risultano sempre inferiori ai limiti massimi ammessi dalle linee tecniche di difesa integrata, nelle colture arboree essi sono generalmente inferiori ai valori tabulati, in quanto l'applicazione calcola lo stretto necessario a garantire la copertura in base alle caratteristiche di ogni impianto.

L'applicazione fornisce indicazioni esaustive per la corretta taratura degli atomizzatori, ovvero restituisce valori di pressione, portata, volume di irrorazione e velocità di avanzamento, inserendo tutti gli altri parametri operativi noti. Nello specifico, distingue tra irroratrici a barre per colture erbacee ed atomizzatori da frutteto e permette di selezionare il modello di ugelli e il colore, scegliendo tra la classificazione ISO e quelle TeeJet, Albuz e ASJ.

I risultati sono immediati e conformi a quelli delle altre app poste a confronto, fornisce indicazioni sia sulla portata di ogni singolo ugello, sia sulla portata complessiva in l/min, facilitando le operazioni di taratura delle macchine. Inoltre, conferma o segnala eventuali errori di digitazione dei parametri operativi, e non completa il calcolo se i valori inseriti sono

incompatibili tra loro. Sono state tuttavia notate anche delle criticità che in futuro dovrebbero essere, se possibile, colmate. Taratura.snap, ad esempio, non è in grado di dare consigli sul tipo di ugello più adatto in base alle condizioni operative, non fornisce stime sulla dimensione delle gocce e non considera la portata del volume d'aria negli atomizzatori ad aereo convenzione.

L'applicazione è stata comunque posta a confronto con altre le applicazioni simili presenti sui principali *store*: i risultati di tale confronto sono riportati in tabella 7. In base a quanto emerso, taratura.snap risulta l'unica in grado di fornire indicazioni sia sulla taratura che sui volumi di irrorazione basati sulle caratteristiche del trattamento o della coltura. È disponibile sia per *Android* che *iOS* ed è sempre fruibile e consultabile anche in modalità *offline*.

App	Condizioni favorevoli al trattamento	N° colture	Erbacee/Arboree	N° tipi di trattamento	Selezione modello ugelli	Consigli modelli ugelli	Calcolo volume chioma	Calibrazione irroratrice
Taratura.snap	Si	18	Si	5* solo erbacee	ISO; Albuz; Teejet; ASJ	No	Si	Si
App 2	No	N.S.	Si	N.S.	ISO; Albuz	Si	No	Si
App 3	No	N.S.	Si	5	Teejet; ISO	Si	No	Si
App 4	No	N.S.	N.S.	N.S.	ISO	No	No	Si
App 5	No	8	Solo Arboree	5	N.S.	No	Si	No

Tabella 7. Risultati del confronto dell'applicazione di taratura. snap e delle sue funzioni con altre applicazioni simili. N.S.: dato non richiesto. * la scelta è richiesta solo nel caso delle colture erbacee.

In abbinamento ai DSS, taratura. snap è un valido strumento a completamento dei mezzi a disposizione degli operatori per una corretta esecuzione dei trattamenti fitosanitari. Tali strumenti lo supportano dalla scelta del momento d'intervento, in base agli output forniti dalla modellistica fitopatologica e ai modelli di dinamica di protezione dei trattamenti effettuati, alla definizione dei parametri da impiegare, grazie alle diverse possibilità di calcolo, al calcolo delle dosi in base al *Tree Row Volume*, fino alla definizione delle migliori finestre d'applicazione (in base alle condizioni ambientali).

L'impiego di queste tecnologie "smart" permette di ottenere una serie di benefici economici risultanti dall'ottimizzazione degli input e dalla riduzione della pressione esercitata dal trattamento sulla salute e sull'ambiente, in linea con i principi di sostenibilità economica, sociale e ambientale della moderna agricoltura (Anselmi & Legler, 2021).

9.5 Bibliografia

- Ahmad, F., Khaliq, A., Qiu, B., Sultan, M., & Ma, J. (2020). Advancements of Spraying Technologies in Agriculture. In *Tecnologies in Agriculture*.
- Ahmadzadegan, M. H., Izadyar, M., Deilami, H. A., Sabitha Banu, A., & Ghorbani, H. (2020). Detailed Study on the Features of Mobile Applications. *Proceedings of the International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems, ICESC 2020, July*, 901–907. <https://doi.org/10.1109/ICESC48915.2020.9155780>
- Albuz. (n.d.). <https://albuz-spray.com/fr/fr-agriculture>.
- Alshuqayran, N., Ali, N., & Evans, R. (2016). A systematic mapping study in microservice architecture. In IEEE (Ed.), *Proceedings - 2016 IEEE 9th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA 2016)* (pp. 44–51). <https://doi.org/10.1109/SOCA.2016.15>

- Anselmi, A., & Legler, S. E. (2021). Un'app innovativa per la taratura delle irroratrici. *L'Informatore Agrario*, 2, 46–49.
- ARPAE. (n.d.). *Scala Beaufort della forza del vento*.
- ASJ. (n.d.). <https://asjnozzle.it/>.
- Baetens, K., Ho, Q. T., Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Melese Endalew, A., Hertog, M. L. A. T. M., Nicolai, B., Ramon, H., & Verboven, P. (2009). A validated 2-D diffusion-advection model for prediction of drift from ground boom sprayers. *Atmospheric Environment*, 43(9), 1674–1682. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.047>
- Baldoin, C. (2008). Come scegliere gli ugelli per i trattamenti a frutteto e vigneto. *L'Informatore Agrario*, 12, 36–39.
- Baldoin, C. (2019). *Irroratrici. Scelta, manutenzione ed uso in campo* (2^a Edizione). Edagricole - New Business Media.
- Balsari, P., Marucco, P., & Oggero, G. (2013). *Le Buone Pratiche per la mitigazione del rischio di deriva del prodotto fitosanitario*. (D. S. A. F. . (Università degli S. di Torino) (ed.)).
- Balsari, P., Oggero, G., Davide, A., Liberatori, S., & Limongelli, R. (2010). *Attività di Controllo Funzionale e Regolazione delle macchine irroratrici in uso in Italia*. STILGRAFICA srl.
- Byers, R. E., Hickey, K. D., & Hill, C. H. (1971). Base gallonage per acre. *Virginia Fruit*, 60, 19–23.
- Caffi, T., Legler, S. E., & Rossi, V. (2016). L'applicazione dei sistemi di supporto alle decisioni nella moderna difesa integrata delle colture. In Edagricole-New Business Media (Ed.), *Difesa sostenibile delle colture* (pp. 171–190). Battilani, P.
- D'Alicandro, N. (2020). *La banda ultra larga nelle aree rurali: il divario digitale è ancora da superare*. PianetaPSR.
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *Environmental Research Public Health*, 8, 1402–1419.
- De Schampheleire, M., Baetens, K., Nuyttens, D., & Spanoghe, P. (2008). Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops. *Crop Protection*, 27(3–5), 577–589. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.08.017>
- Deveau, J. (2016). *How to Confirm Coverage with Water-Sensitive Paper*. Sprayers101.

- Deveau, J. (2021). *Assessing Water Sensitive Paper – Part 1. Sprayers*101.
- Donati, P. (2018). Componenti delle macchine irroratrici. Gli ugelli. *Approfondimento CRPV: Distribuzione Fitofarmaci*, 2, 9.
- EPPO. (2021). PP 1/239 (3) Dose expression for plant protection products. *EPPO Bulletin*, 51(1), 10–33. <https://doi.org/10.1111/epp.12704>
- Esau, T. J., Zaman, Q. U., Chang, Y. K., Groulx, D., Schumann, A. W., & Farooque, A. A. (2014). Prototype variable rate sprayer for spot-application of agrochemicals in wild blueberry. *Applied Engineering in Agriculture*, 30(5), 717–725. <https://doi.org/10.13031/aea.30.10613>
- European Parliament. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Union*.
- European Parliament. (2009a). Directive 2009/127/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 amending Directive 2006/42/EC with regard to machinery for pesticide application. *Official Journal of the European Union*.
- European Parliament. (2009b). Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. *Official Journal of the European Union*, 309.
- Europos Komisija. (2021). Digital Economy and Society Index – DESI. *Clinical Epigenetics*.
- Friessleben, R., H.J., R., & Elbert, A. (2007). Dose expression in plant protection field testing in high crops: need for harmonization. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer*, 60, 85–95.
- Garcer, C., Fonte, A., Molt, E., & Chueca, P. (2017). Sustainable Use of Pesticide Applications in Citrus: A Support Tool for Volume Rate Adjustment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(715), 14. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070715>
- Gil, E. (2001). Metodología y criterios para la selección y evaluación de equipos de aplicación de fitosanitarios para la viña. In *thesis*. Universitat de Lleida.
- Gil, E., Arnó, J., Llorens, J., Sanz, R., Llop, J., Rosell-Polo, J. R., Gallart, M., & Escolà, A. (2014). Advanced technologies for the improvement of spray application techniques in Spanish viticulture: An overview. *Sensors (Switzerland)*, 14, 691–708.

- Gil, E., Campos, J., Ortega, P., Llop, J., Gras, A., Armengol, E., Salcedo, R., & Gallar, M. (2019). *DOSAVIÑA: a new decision support system for more sustainable and efficient use of plant protection products in vineyards Abstract*.
- Gil, E., Campos, J., Ortega, P., Llop, J., Gras, A., Armengol, E., Salcedo, R., & Gallart, M. (2019). DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. *Computers and Electronics in Agriculture*, *160*, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.018>
- Gil, E., & Escolà, A. (2009). Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, *25*(2), 145–152.
- Gil, E., Gallart, M., Doruchowski, G., Balsari, P., Codis, S., Marucco, P., Roettele, M., Herbst, A., & Pauwelyn, E. (2013). Drift mitigation training: key point to improve pesticide use. Formative actions under TOPPS-Prowadis project. *12th Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing*, 159–161.
- Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A., & Rosell-Polo, J. R. (2013). Variable rate sprayer. Part 2 - Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *95*, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.010>
- ISO 10625 (E). (2018). *Equipment for crop protection — Sprayer nozzles — Colour coding for identification*.
- ISO 22866. (2005). International Standard – Crop Protection Equipment – Methods for Field Measurement of Spray Drift. *Geneva, Switzerland*.
- Jobe, W. (2013). Native Apps Vs. Mobile Web Apps. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, *7*(4), 27. <https://doi.org/10.3991/ijim.v7i4.3226>
- Kaul, P., Gebauer, S., Moll, E., & Neukampf, R. (2004). German Regulation: Drift Modelling. *International Conference on Pesticide Application for Drift Management*, 85–96.
- Leffelaar, P. A., & Ferrari, T. J. (1989). Some elements of dynamic simulations. In R. Rabbinge, S. A. Ward, & H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and systems management in crop protection* (pp. 19–45).
- Levi, E. (2019). *Progettazione e sviluppo di un 'architettura a microservizi per la raccolta e l'analisi di dati di mobilità e di affollamento di edifici*.

- Magarey, R. D., Travis, J. W., Russo, J. M., Seem, R. C., & Magarey, P. A. (2002). Decision support systems: Quenching the thirst. *Plant Disease*, 86(1), 4–14. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.1.4>
- Manktelow, D. W. L., & Praat, J.-P. (1997). The tree-row-volume spraying system and its potential use in New Zealand. *Proceedings of the New Zealand Plant Protection Conference*, 50, 119–124. <https://doi.org/10.30843/nzpp.1997.50.11360>
- Matthews, G. A., & Roy, B. (2016). *Pesticide application methods* (Vol. 4, Issue 1).
- Mescalchin, E., Agabiti, B., Guerra, A., Bertoldi, D., Larcher, R., Gobber, M., & Tonni, M. (2011). Come migliorare in vigneto la distribuzione degli agrofarmaci. *L'Informatore Agrario*, 21, 5–9.
- Michael, C., Gil, E., Gallart, M., & Stavrinides, M. C. (2020). Influence of spray technology and application rate on leaf deposit and ground losses in mountain viticulture. *Agriculture (Switzerland)*, 10(615), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120615>
- Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Rodríguez-Lizana, A., Cuenca, A., Gil, E., Blanco-Roldán, G. L., & Gil-Ribes, J. A. (2016). Assessing the optimal liquid volume to be sprayed on isolated olive trees according to their canopy volumes. *Science of the Total Environment*, 568, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.013>
- Mosetti, D., Silvotti, P., & Bigot, G. (2019). Taratura delle irroratrici: scelte operative per uva sane. *Vite&Vino*, 1, 32–37.
- Mosetti, D., Sivilotti, P., & Bigot, G. (2019). The calibration of the sprayers and the factors involved in coverage uniformity in the vineyard. *BIO Web of Conferences*, 13(02001), 1–4. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191302001>
- Norboddy, A., & Skurterud, R. (1974). The effects of boom height, working pressure and wind speed on spray drift. *Weed Research*, 14(6), 385–395. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01080.x>
- Nuyttens, D., Schampheleire, M. D., Steurbaut, W., Baetens, K., Verboven, P., Nicolai, B., Ramon, H., & Sonck, B. (2006). Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, part 1: meteorological conditions. *Aspects of Applied Biology*, 77(January), 1–8.

- Pergher, G., & Zucchiatti, N. (2018). Influence of canopy development in the vineyard on spray deposition from a tunnel sprayer. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(3), 164–173. <https://doi.org/10.4081/jae.2018.801>
- Phillips, J. C., & Miller, P. C. H. (1999). Field and wind tunnel measurements of the airborne spray volume downwind of single flat-fan nozzles. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 72(2), 161–170. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0359>
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rüegg, J., Siegfried, W., Raisigl, U., Viret, O., Steffek, R., Reisenzein, H., & Persen, U. (2001). Registration of plant protection products in EPPO countries: Current status and possible approaches to harmonization. *EPPO Bulletin*, 31(2), 143–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2001.tb00983.x>
- Rüegg, J., & Viret, O. (1999). Determination of the tree row volume in stone-fruit orchards as a tool for adapting the spray dosage. *EPPO Bulletin*, 29(1–2), 95–101. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1999.tb00802.x>
- Rüegg, J., Viret, O., & Raisigl, U. (1999). Adaptation of spray dosage in stone-fruit orchards on the basis of tree row volume. *EPPO Bulletin*, 29(1–2), 103–110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1999.tb00803.x>
- Russu, R., & Vieri, M. (2003). *Macchine irroratrici agricole: controlli e tarature per una maggiore efficienza e sicurezza di impiego Quaderno ARSIA 5/2003*.
- Savi, D. (1996). *Attrezzatura per la difesa delle piante. Guida alla scelta e al corretto impiego*. Edizioni l'Informatore Agrario.
- Silva Junior, G. J., Scapin, M. d. S., Silva, F. P., Silva, A. R. P., Behlau, F., & Ramos, H. H. (2016). Spray volume and fungicide rates for citrus black spot control based on tree canopy volume. *Crop Protection*, 85, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.014>

- Sutton, T. B. (1988). Evaluation of the Tree-Row-Volume Model for Full-Season Pesticide Application on Apples. In *Plant Disease* (Vol. 72, Issue 7, p. 629). <https://doi.org/10.1094/pd-72-0629>
- Sutton, T. B., & Unrath, C. R. (1984). Evaluation of the Tree-Row-Volume Concept with Density Adjustments in relation to Spray Deposits in Apple Orchards. *Plant Disease*, 68(6), 480–484.
- Syngenta. (2012). *Water-sensitive paper for monitoring spray distribution* (pp. 1–15).
- Syngenta. (2014a). *Agricultura Responsabile*.
- Syngenta. (2014b). *Quaderno: Agricoltura Responsabile. Site*.
- TeeJet. (n.d.). https://www.teejet.com/it/spray_application/nozzles.aspx.
- Toews, R. B., & Friessleben, R. (2012). Dose Rate Expression: Need for Harmonization and Consequences of the Leaf Wall Area Approach. *Erwerbs-Obstbau*, 54(2), 49–53. <https://doi.org/10.1007/s10341-012-0161-z>
- Unrath, C. R. (2002). Spray volume, canopy density, and other factors involved in thinner efficacy. *Hort Science*, 37(3), 481–483. <https://doi.org/10.21273/hortsci.37.3.481>
- Villamizar, M., Garcés, O., Castro, H., Verano, M., Salamanca, L., & Gil, S. (2015). Evaluating the Monolithic and the Microservice Architecture Pattern to Deploy Web Applications in the Cloud Evaluando el Patrón de Arquitectura Monolítica y de Micro Servicios Para Desplegar Aplicaciones en la Nube. In IEEE (Ed.), *10th Computing Colombian Conference (10CCC)* (pp. 583–590).
- Viret, O., Dubuis, P.-H., Bloesch, B., Fabre, A.-L., & Dupuis, D. (2010). Dosage des fongicides adapté à la surface foliaire en viticulture : efficacité de la lutte. *Revue Suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 42(4), 226–233.
- Viret, O., Siegfried, W., Bloesch, B., Tailens, J., & Mittaz, C. (2007). Dosage des fongicides adaptés à la surface foliaire: résultats en 2006. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture*, 39(1), 65–70.

CAPITOLO 10 - CONCLUSIONI

È noto che l'olivicoltura italiana soffre di gravi criticità, tra cui forse la più importante è rappresentata dagli attacchi parassitari, che si stanno via via aggravando a causa dei cambiamenti climatici. Accanto alle ricorrenti endemiche infezioni dell'occhio di pavone da *Venturia oleaginea*, stiamo infatti registrando un'inquietante diffusione della famigerata *Xylella fastidiosa*, di recente introduzione, un notevole incremento degli attacchi della mosca olearia, *Bactrocera olea*, e una progressiva diffusione dell'antracnosi da *Colletotrichum* spp., innescata dalle forti recrudescenze degli anni Novanta nel sud del nostro Paese. Tali problemi sono resi particolarmente preoccupanti sia dalle recenti normative dell'Unione Europea (Direttiva 2009/128; Direttiva 2019/782) sulla lotta biologica e integrata, via via recepite dal nostro Paese, con l'interdizione o la limitazione di molti antiparassitari e con indicazioni sempre più puntuali sui trattamenti fitosanitari, sia dalle difficoltà operative nei trattamenti di difesa in numerosissimi impianti olivicoli collinari, di grande valenza paesaggistica e culturale, ma che sono caratterizzati da scomoda dislocazione orografica.

In questo quadro, le ricerche della mia Tesi di Dottorato avevano come obiettivo la messa a punto di strumenti innovativi che potessero aiutare gli olivicoltori a meglio salvaguardare i loro impianti da suddetti problemi, nel pieno rispetto delle nuove normative U.E. e nazionali.

Per meglio indirizzare la mia Tesi, è stato svolto un lavoro orientativo, collaborando alla creazione del *software* olivo.net nell'ambito delle attività di Horta srl, basato su un insieme di modelli integrati in grado di prevedere le necessità dei vari interventi agronomici e di alcuni trattamenti fitosanitari (Anselmi et al., 2017). Fruibile via Internet dalle aziende agricole e dai tecnici, in tempo reale e in modo interattivo, oltre a favorire varie attività di monitoraggio in campo, detta piattaforma informatica ha permesso di offrire assistenza tecnica e informazioni aggiuntive agli olivicoltori, per integrare e migliorare le specifiche competenze. Nel campo della difesa fitosanitaria esso, tuttavia, mancava di strategie previsionali per vari importanti parassiti e non contemplava alcuno strumento per 'controllare' la razionalità della distribuzione degli antiparassitari.

Sulla base di questa fase propedeutica, molto importante per le esperienze maturate nel settore dell'olivicoltura e per i primi approcci nel campo della modellistica fitosanitaria, tenute presenti

le già menzionate lacune, con la mia Tesi ho voluto sviluppare moduli innovativi per la messa a punto di sistemi previsionali sullo sviluppo dei tre più importanti agenti di malattia dell'olivo e per la pratica applicazione dei trattamenti fitosanitari.

Nell'insieme tali mie ricerche hanno permesso di concretizzare:

- 1) un modello meccanicistico previsionale guidato dalle condizioni meteorologiche, per *Colletotrichum* spp;
- 2) un processo di validazione per la funzione di sporulazione, per *Venturia oleaginea*; volta ad implementare il modello già presente di olivo.net;
- 3) un modello empirico dello sviluppo di *Philaenus spumarius*, vettore di *Xylella fastidiosa*;
- 4) un'app nativa volta ad ottimizzare la regolazione strumentale delle irroratrici e migliorare la pratica esecuzione dei trattamenti antiparassitari.

Le ricerche portate avanti sono state piuttosto complesse, lunghe e impegnative, con laboriosi approfondimenti sugli aspetti biologici ed epidemiologici dei parassiti considerati, analisi dei fattori predisponenti e concorrenti, complesse elaborazioni e costruzioni di confacenti schemi matematici, configurazione progettuale di idonei sistemi operativi, analisi di laboratorio, sperimentazione e validazione presso oliveti dislocati in realtà diverse attraverso una coordinata collaborazione di olivicoltori, tecnici, organizzazioni professionali, Enti vari.

Quantunque spesso fortemente ostacolati dall'avvento della pandemia Covid, soprattutto nelle parti che prevedevano sperimentazioni di campo, i risultati raggiunti sono stati di notevole rilievo scientifico e tecnico, offrendo contributi innovativi per migliorare la difesa fitosanitaria dell'olivo, in cui ad una buona efficienza si unisce una forte riduzione dei rischi di inquinamento ambientale e dei costi di applicazione, tutti aspetti che vanno incontro al programma *Farm to Fork* della strategia *Green Deal* (Anonimo, 2020; Cagliero *et al.*, 2021; Comegna e Pascale, 2021; De Castro *et al.*, 2020; Franco 2021; Sandroni 2021).

10.1 Modello meccanicistico previsionale per *Colletotrichum* spp

L'antracnosi dell'olivo, causata da un complesso di specie diverse afferenti al genere *Colletotrichum*, è considerata la più importante malattia dell'olivo a livello mondiale (Moral *et al.*, 2021),

Solo in rari casi gli strumenti di lotta agronomica possono evitare la malattia, per cui in genere è necessario fare ricorso alla difesa chimica. La tempistica delle applicazioni di prodotti fitosanitari risulta sempre fondamentale per il controllo del patogeno, tenendo presente che la relativa efficacia è maggiore quando le irrorazioni sono preventive.

Al fine di una messa a punto di modelli previsionali degli attacchi, assai importante per minimizzare i trattamenti, alla luce di quanto emerso da accurati approfondimenti sul ciclo vitale e sull'epidemiologia del patogeno, sono riuscito a realizzare un modello meccanicistico previsionale guidato dalle condizioni meteorologiche.

Il primo passo per raggiungere l'obiettivo è stato quello di svolgere un'accurata analisi della letteratura al fine di reperire informazioni quanto più complete ed approfondite sulla biologia, sull'ecologia e sull'epidemiologia delle specie afferenti al complesso *C. acutatum* in senso lato che causa la malattia.

Attraverso l'analisi di sistema (Leffelaar & Ferrari, 1989; Rossi et al., 2010), le informazioni provenienti dalla ricerca bibliografica sono state poi utilizzate per concettualizzare il modello e disegnare un diagramma relazionale che andasse a rappresentare la struttura e la dinamica del sistema patogeno-ambiente, descrivendolo poi per mezzo di equazioni matematiche che hanno permesso di mettere in relazione le variabili esterne e trainanti con i rispettivi tassi.

Il modello è stato poi valutato in base al suo scopo definito (Madden et al., 2007), ossia la sua capacità di rappresentare il sistema e di prevedere lo sviluppo di epidemie di antracnosi dell'olivo. I risultati del modello sono stati convalidati rispetto a dati reali ottenuti dal 2017 al 2019 da nove epidemie di antracnosi dell'olivo in parcelle non trattate in cinque oliveti situati nella regione Puglia. In tal senso, il modello relativo alla difesa dell'olivo contro *Colletotricum* ha dimostrato una buona attendibilità nel prevedere le infezioni secondarie del patogeno, con una impostazione corretta e una valida applicabilità nelle più varie aree olivicole.

La retta di regressione tra l'incidenza del patogeno prevista dal modello e quella effettivamente rilevata in campo, in occasione dei 52 rilievi effettuati nel triennio 2017-2019 in Salento, presenta un buon coefficiente di determinazione, pari a 0,798.

Sebbene con leggere tendenze ora alla sovrastima ora alla sottostima, il risultato è apparso infatti soddisfacente in tutte le stazioni sotto osservazione e in tutti i momenti della stagione vegetativa estivo autunnale, periodo in cui si sviluppano e poi accrescono gli attacchi sintomatici più gravi della malattia.

Il modello ha dimostrato pertanto di riuscire a prevedere l'incidenza della malattia nel tempo, in qualunque situazione stagionale e in qualunque fase della maturazione delle drupe.

Inoltre, il modello aspira ad essere un valido strumento predittivo da fornire agli utenti, per garantire supporto nella gestione della malattia e nella programmazione dei trattamenti fitosanitari

Data la sua struttura meccanicistica e la sua dipendenza dalle condizioni meteorologiche e della fase di sviluppo dell'olivo, attraverso questo modello infatti non sarà difficile colmare gli studi

sia per prevenire le infezioni primarie, sia per valutare le soglie di infezioni tollerabili e stabilire i momenti più idonei per gli interventi di lotta.

Sarà comunque opportuno approfondire le indagini anche in altre zone, come la Calabria e la Sicilia, così da prendere in esame coacervi diversi delle varie specie di *Colletotrichum*, prendendo in esame anche le cultivar di olivo meno suscettibili (Agosteo et al, 2002; Cacciola et al., 2012; Moral and Traperò, 2009; Moral et al., 2017; Mosca et al, 2014). Sarà altresì importante condurre ulteriori indagini sui fattori che possono potenzialmente influenzare il periodo di incubazione, quali la cultivar, la maturazione delle drupe e le diverse specie di *Colletotrichum* (Moral et al., 2009b).

10.2 Sviluppo di una funzione di sporulazione per *Venturia oleaginea*

L'Occhio di Pavone, provocato dal fungo *Venturia oleaginea*, è la più comune e diffusa malattia dell'olivo che se non correttamente gestita può in alcuni Paesi, Italia inclusa, può causare notevoli danni.

Con le mie ricerche ho studiato l'effetto della temperatura, dell'umidità fogliare e dell'umidità relativa sulla produzione di conidi del patogeno e sullo sviluppo delle lesioni di occhio di pavone.

La sporulazione della *V. oleaginea* nell'oliveto è stata studiata ponendo sotto le piante adulte collettori capta spore, per valutare i conidi liberati dalle piogge, e giovani piante esca, per valutare l'incidenza delle infezioni nei medesimi periodi. Il confronto di questi dati ha portato a verificare l'inadeguatezza di precedenti funzioni riscontrate nella letteratura a predire le infezioni, soprattutto nel periodo estivo, mentre ha dimostrato la buona attendibilità della funzione da noi messa a punto, che riesce a meglio correlare le ipotetiche manifestazioni della malattia con i dati meteorologici. I risultati ottenuti hanno innanzitutto confermato l'importanza della temperatura, della bagnatura delle foglie e dell'umidità dell'aria sulla sporulazione del fungo e sullo sviluppo delle macchie fogliari, in concordanza con quanto riportato dalla bibliografia.

In particolare, è emerso come la sporulazione sia favorita da un'elevata umidità dell'aria e da temperature fresche, comprese tra 10 e 20 °C, con un ottimo a 15°C., con valori minimi durante l'estate e massimi durante i periodi primaverili e autunnali. Anche le manifestazioni hanno avuto un comportamento simile.

La nuova funzione, oltre ad evidenziare gran parte delle variazioni nella capacità di sporulazione da parte delle lesioni del patogeno, si è dimostrata in grado di predire la manifestazione della malattia anche durante il periodo estivo, anche quando l'incidenza era modesta.

Nel complesso, il modello ha infatti evidenziato gran parte della variazione nella capacità di sporulazione delle lesioni di *V. oleaginea* e può quindi essere utilizzato a fini predittivi nell'intervallo di temperatura e alle varie condizioni di umidità testate.

Il prototipo di modello basato sull'approccio dell'analisi di sistema si è dimostrato pertanto uno strumento utile per migliorare la conoscenza del sistema patogeno. Data la sua struttura meccanicistica e la sua dipendenza dalle condizioni meteorologiche e dallo stato vegetativo dell'olivo, il modello potrebbe essere utilizzato in futuro, come strumento predittivo per la gestione della malattia e per programmare i trattamenti fitosanitari.

Potrà, altresì, essere inserito in olivo.net, in quanto si va ad integrare molto bene con i diversi modelli già presenti in esso (es modello fenologia della coltura). Esso permetterebbe così di fornire informazioni e allerte più complete e di supporto alle decisioni degli utenti di tale DSS, in particolare agli agricoltori, per sviluppare una strategia sostenibile di controllo dell'occhio di pavone dell'olivo nell'ambito dell'approccio *IPM* tra gli olivicoltori.

Sono tuttavia necessarie ulteriori ricerche per indagare l'effetto di altri fattori come la luce, il vento, la cultivar, la temperatura fluttuante e il periodo umido interrotto sulla produzione di conidi e sulle infezioni. Ulteriori ricerche potrebbero essere condotte sulla relazione tra i livelli di tricomi sulle foglie di olivo e la suscettibilità alla malattia in funzione dell'età delle foglie e della cultivar di olivo, alla ricerca di informazioni che potrebbero risultare utili per la selezione di cultivar resistenti

10.3 Modello empirico basato sui gradi giorno dello sviluppo di *Philaenus spumarius*

Philaenus spumarius è il principale vettore di *Xylella fastidiosa* sottospecie *pauca* ST53, una grave minaccia per le coltivazioni olivicole nell'Italia meridionale (e oltre) a causa del suo coinvolgimento nella Sindrome del Declino Rapido dell'Olivo (Cornara et al., 2017).

Considerato il ruolo centrale che *P. spumarius* riveste nell'epidemiologia del batterio, a seguito della sua abbondante presenza sulla vegetazione (Cornara et al., 2017) e a seguito delle imposizioni di interventi di gestione obbligatori da parte della Commissione Europea (European Parliament, 2016), si è ritenuto opportuno sviluppare e calibrare un modello empirico sullo

sviluppo del vettore basato sui gradi-giorno (*GDD*), in funzione delle soglie termiche, che potesse aiutare a migliorarne la gestione in ambiente Mediterraneo.

Partendo da un'accurata analisi della letteratura, allo scopo di approfondire la modellistica entomologica, concettualmente e formalmente distinta da quella epidemiologica di cui mi sono principalmente occupato, e gli aspetti biologici, fenologici ed ecologici del vettore, sono state impostate delle prove di monitoraggio in 41 siti pugliesi, selezionati sulla base della gestione a basso *input* e della conseguente gestione senza insetticidi.

Attraverso tali rilievi sono state monitorate le popolazioni ninfali con il metodo del campionamento a quadrato (tecnica del transetto), frequentemente utilizzato per quantificare la densità delle ninfe di sputacchina (Cornara et al., 2018; Biedermann, 2003; Dongiovanni et al., 2019) e riconosciuto dall'EFSA (Vos et al., 2019). Gli adulti dell'insetto sono stati invece campionati con una rete a maglie larghe su tre diversi tipi di vegetazione.

Al fine di poter computare le risorse termiche e alla conseguente analisi della loro relazione con lo sviluppo di *P. spumarius*, si è provveduto quindi al calcolo delle serie termiche giornaliere (temperatura massima e minima) appoggiandosi alla rete meteorologica delle stazioni Horta, che ha permesso la spazializzazione dei dati per i 41 siti di monitoraggio.

La fenologia di *P. spumarius* è stata poi studiata in relazione della legge delle temperature effettive totali e delle soglie termiche individuate a partire dalla ricerca bibliografica, riuscendo così a definire le costanti termiche in relazione ai dati osservati in campo.

In funzione delle soglie termiche individuate sono stati determinati gli accumuli dei *Growing Degree Days* dei 41 siti di monitoraggio.

Si è proceduto poi a definire le regressioni lineari e i corrispondenti coefficienti di correlazione, tra la percentuale degli stadi di sviluppo di *P. spumarius* osservati nei diversi siti di monitoraggio durante la stagione 2019, con i rispettivi cumuli di *GDD* calcolati dalle diverse soglie termiche.

Questa ricerca ha fornito risultati dalla duplice importanza pratica: da un lato essa ha permesso di ottenere informazioni biologiche ed ecologiche di base sullo sviluppo dell'insetto nel contesto italiano, dall'altro le indicazioni ottenute rappresentano un passo fondamentale per la realizzazione di modelli più complessi, sulla dinamica di popolazione, estremamente importanti per giungere a modelli previsionali per la lotta contro le forme giovanili. Si risponderebbe così all'Unione Europea, che invita alla messa a punto di efficaci strategie di gestione del vettore, possibilmente ricorrendo a metodologie avanzate, in modo da poter aiutare gli agricoltori verso una confacente programmazione degli interventi fitosanitari.

10.4 App a supporto del processo di regolazione strumentale

Il processo decisionale in agricoltura è costituito da decisioni di tipo strategico, tattico ed operativo (Rossi et al., 2012; Caffi et al., 2016).

Il primo tipo di decisioni riguarda, ad esempio, la scelta delle cultivar, delle forme d'allevamento, delle rotazioni colturali, della potatura, della conduzione del suolo, mentre il secondo trova giustificazione a seguito di monitoraggi delle avversità nella coltivazione, dell'impiego di soglie d'intervento e modelli matematici e di sistemi di previsione scientificamente validi, e si concretizza con la decisione volta alle misure di lotta da utilizzare contro i singoli parassiti e il momento ottimale di intervento. Infine, a livello operativo chi attua le operazioni di gestione deve decidere in merito ai mezzi di intervento da utilizzare, sulla loro corretta regolazione e adeguata manutenzione, nonché sul tipo di trattamento da adottare, sulla definizione dei parametri d'irrorazione ottimale e sulla verifica di distribuzione post-trattamento, passaggio fondamentale in quanto serve a determinare se l'operazione è stata o meno efficace, documentando i benefici per la coltura e i possibili miglioramenti (Rossi et al., 2012; Caffi et al., 2016).

Un uso efficiente dei prodotti per la protezione delle piante e un processo decisionale correttamente supportato sono elementi importanti per un controllo sostenibile dei fitoparassiti e per aumentare la resa quali quantitativa dei raccolti (Gil et al., 2014).

Consapevoli quindi della necessità di contemplare il processo decisionale nella sua interezza, volgendo la dovuta attenzione anche alle decisioni operative, e consapevoli inoltre del fatto che nell'ambito della Direttiva 128 sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari vengono proposti obiettivi specifici per ridurre l'uso e il rischio legato ai prodotti fitosanitari, si è ritenuto importante dedicare un modulo della Tesi a un sistema di supporto alle decisioni che guidasse gli utenti nella delicata fase della taratura e della verifica della distribuzione dei prodotti fitosanitari.

Le nuove tecnologie informatiche possono certamente aiutare gli agricoltori in questo processo, rendendo rapida ed efficace la regolazione strumentale delle attrezzature.

Tenendo in considerazione l'assenza in olivo.net di un sistema a supporto dell'importante fase decisionale operativa di cui sopra e analizzando il contesto in cui tale fase si realizza, si è deciso di sviluppare e testare un'applicazione nativa per dispositivi mobili, in grado di operare anche *off-line*, che supportasse e guidasse l'utente durante le principali fasi della taratura dell'irroratrice e dell'esecuzione del trattamento, in modo semplice e veloce, fornendo una

lettura immediata dei parametri necessari a configurare l'attrezzatura e facilmente impiegabile per tutte le macchine che montano ugelli (irroratrici idrauliche "a barra" e atomizzatori).

L'ulteriore scopo di questa attività è stato inoltre quello di mettere a sistema e rendere facilmente fruibili sia tutte quelle conoscenze scientifiche che, in vari studi e prove applicative, hanno consentito riduzioni dei volumi d'acqua del 30-40% e dei prodotti fitosanitari del 20-50 % per la coltura della vite (Gil & Escolà, 2009; Gil et al., 2013; Viret et al., 2007; Viret et al., 2010), come pure diminuzioni significative dei mezzi tecnici anche per pomacee (Sutton & Unrath, 1984), drupacee (Rüegg et al., 1999) e lo stesso olivo (Miranda-Fuentes et al., 2016) e sia i diversi *Framework* definiti dalle Direttive sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari (European Parliament, 2009b), sull'utilizzo delle acque (European Parliament, 2000) e sull'utilizzo delle macchine per i trattamenti (European Parliament, 2009a).

Infine, lo strumento aspira ad essere utilizzato come mezzo educativo da parte dei consulenti. In questo processo dovrebbero essere evidenziati i principali fattori di rischio per consentire all'utente di comprendere la natura del problema e riconoscere la relazione tra i fattori di rischio e la deriva dell'irrorazione, fornendo i suggerimenti sulle misure di mitigazione della deriva e indicazioni immediate e facilmente interpretabili sulla loro efficacia.

L'utente che utilizza l'applicativo è guidato attraverso la definizione dei seguenti parametri e operazioni: i) il volume di distribuzione; ii) la taratura dell'irroratrice; iii) l'applicabilità del trattamento; iv) la verifica della distribuzione. Infine, per tenere traccia degli *output* e applicarli nuovamente in caso di necessità, nell'app è stato previsto un archivio digitale delle operazioni. Dunque, in abbinamento ai vari modelli previsionali, taratura.snap completa gli strumenti a disposizione degli operatori per una corretta esecuzione dei trattamenti fitosanitari, dalla scelta del calcolo del volume di distribuzione (in base al *Tree Row Volume*), all'ottimizzazione della funzionalità delle irroratrici, alla definizione delle migliori finestre d'applicazione (in base alle condizioni ambientali).

La messa a punto dell'app (Anselmi & Legler, 2021) è andata a migliorare la qualità di detti trattamenti fitosanitari, permettendo di ottimizzare il volume d'irrorazione per la coltura d'interesse, di evitare il più possibile lo sgocciolamento e la deriva e di garantire una più uniforme copertura della superficie vegetale, con notevole incremento dell'efficacia dell'intervento e una significativa riduzione dell'impatto ambientale e del costo operativo. Attraverso le varie funzioni è possibile ottimizzare una serie di parametri operativi, quali la velocità di avanzamento, la pressione di esercizio, la portata da erogare, il volume da distribuire, le caratteristiche e lo stato degli ugelli e delle piastrine; tale app permette infatti di tarare adeguatamente l'irroratrice, in rapporto alle esigenze dell'operatore e alla specifica

applicazione, tenendo sotto controllo l'uniformità e la penetrazione della bagnatura e, in definitiva, ottimizzando la qualità e l'omogeneità della distribuzione.

Taratura.snap offre inoltre indicazioni sull'applicabilità del trattamento, stabilendo se vi siano o meno le condizioni ambientali idonee per l'esecuzione del medesimo in base alle condizioni ambientali.

Attraverso un efficiente archivio, essa permette infine di accedere a tutte le precedenti attività salvate dall'utente e classificate in ordine cronologico, rendendo possibile pertanto di riprendere e consultare le passate regolazioni, per poterle nuovamente adottare in situazioni analoghe.

Ciò, oltretutto garantisce trattamenti efficaci e risparmio economico, permette una forte riduzione della pressione esercitata dal trattamento sulla salute e sull'ambiente, in linea con i principi di sostenibilità economica, sociale e ambientale della moderna agricoltura, adattandosi a tutte le colture, sia arboree che erbacee, e ai tipi di irroratrici, da quelle a barra, per le colture erbacee, agli atomizzatori utilizzati sulle colture arboree.

10.5 Considerazioni conclusive

Nell'ambito del Patto Verde o *Green Deal* europeo, presentato dalla UE l'11 dicembre 2019 per una nuova strategia di crescita verso la transizione ecologica, il 20 maggio 2020 la Commissione europea ha presentato la strategia "*Farm to Fork*", piano decennale messo a punto per guidare tale transizione verso un sistema alimentare equo, sano e rispettoso dell'ambiente. Detta strategia prevede infatti, tra l'altro, la riduzione del 50% dell'uso di prodotti fitosanitari e l'aumento del 25% dei terreni in gestione biologica entro il 2030.

Nel frattempo in Italia, la direttiva (UE) 2019/782 del 15 maggio 2019, recepita con DM del 7 novembre 2019 (GU 303 del 28.12.2019) di concerto tra MIPAAF e Ministero della Salute, recante modifica della Direttiva 2009/128/CE, sottolinea le buone pratiche che possono essere adottate come modello per conseguire gli obiettivi di ridurre i rischi e l'impatto dell'utilizzo dei pesticidi sulla salute umana e sull'ambiente e incoraggia lo sviluppo della difesa integrata e biologica e l'implementazione delle tecniche di distribuzione dei prodotti fitosanitari e del controllo funzionale periodico delle irroratrici.

La nuova PAC per gli anni 2023-2027 prevede approcci per l'agricoltura che mirano a ridurre l'impronta ambientale e climatica del suo sistema alimentare, a rafforzarne la resilienza, a garantire la sicurezza dell'approvvigionamento alimentare, a guidare la transizione globale verso la sostenibilità competitiva dal produttore al consumatore, a proteggere la salute pubblica

e salvaguardare le condizioni di vita degli operatori agricoli (Anonimo, 2020), (Bonatti et al., 2020), (Tetro, 2020), (Valeri, 2021). In Italia essa prevede un 40% del budget per azioni legate alla sostenibilità ambientale. Tra i finanziamenti previsti dal Piano nazionale di Ripresa e Resilienza, infine sono contemplati investimenti per l'agricoltura sostenibile e l'economia circolare comprendendo l'ammmodernamento delle macchine agricole, in parte destinate all'agricoltura di precisione in vista di una riduzione dell'uso dei fitofarmaci.

La strategia *Farm to Fork* prevede infine anche sostegni alla transizione ecologica attraverso la ricerca, l'innovazione, la tecnologia e gli investimenti, nonché attraverso servizi di consulenza, condivisione e sviluppo di dati e conoscenze delle competenze chiave degli operatori del settore” (Anonimo, 2020; Bonatti et al., 2020).

Ho voluto ricordare quanto sopra per sottolineare come le ricerche portate avanti con la mia Tesi di Dottorato abbiano portato a risultati in linea con tutti i suddetti programmi strategici, possibilità di intervento e possibili finanziamenti nel settore olivicolo (e non solo).

L'uso di modelli predittivi delle malattie per una protezione sostenibile delle colture consente agli agricoltori di agire al momento giusto e in modo più efficiente, ottimizzando i metodi di gestione delle colture al fine di ridurre le applicazioni di pesticidi e quindi di minimizzare gli effetti sull'ambiente. Questo porta a ridurre i residui di pesticidi sugli alimenti e a diminuire i costi di produzione. Inoltre, questa Tesi sarà utile ai ricercatori per migliorare la comprensione del ciclo di vita dei patogeni e delle relazioni tra l'ospite, il patogeno e l'ambiente.

I modelli sviluppati con la mia Tesi vanno infatti a creare le basi per la messa a punto di modelli previsionali utili ad ottimizzare la lotta contro gli agenti di due importanti patogeni dell'olivo, *Colletotrichum* e *Xylella*. Gli studi sviluppati su *V. oleaginea* vanno a migliorare anche il relativo modello previsionale già incluso in olivo.net. Con i dovuti sviluppi, dette ricerche permetteranno pertanto di coprire la difesa, nella misura più razionale ed innovativa possibile, contro i principali parassiti dell'olivo, colmando le più evidenti carenze di olivo.net. L'app taratura.snap, va inoltre a migliorare notevolmente la pratica dei trattamenti fitosanitari sulla cultura, con indubbi vantaggi salutari, ambientali ed economici. Detta app peraltro, opportunamente modulata, può essere utilizzata per qualsivoglia coltura agraria.

I quattro moduli messi a punto, in definitiva, potranno permettere informazioni dettagliate e in tempo reale sulla necessità di trattamenti fitosanitari e sulla relativa razionalizzazione operativa, aiutando gli agricoltori a prendere "decisioni informate" e ottimizzare l'uso dei prodotti antiparassitari in conformità con le ultime normative comunitarie e nazionali.

Un miglioramento della distribuzione dei prodotti, minimizzando le perdite per deriva o sgocciolamento e garantendo una confacente bagnatura della chioma, con risparmio economico

e abbattimento dei rischi di residui e di inquinamento ambientale, garantirà un'applicazione dei trattamenti in linea con le normative nazionali e comunitarie.

Quanto sopra favorirà altresì l'attuazione di una difesa anche in quei numerosi oliveti di difficile gestione vuoi per le enormi dimensioni delle piante, vuoi soprattutto per la scomodità dell'impianto, permettendo loro di unire ad una insostituibile valenza paesaggistica anche una certa valenza produttiva.

I miei contributi infine, almeno in parte, permetteranno più facili e documentate giustificazioni dell'operatività perseguita nella difesa della coltura da parte dell'imprenditore, qualora l'azienda fosse soggetta a controlli di verifica di conformità.

I risultati delle nostre ricerche permetteranno nel complesso un grosso passo avanti per una completa difesa integrata o biologica dell'olivo, pienamente sostenibile, con indubbi vantaggi di tipo ecologico-sanitari, e permetteranno altresì di fornire 'servizi di consulenza, condivisione e sviluppo di dati e conoscenze' agli operatori del settore, in coerenza con i principi di sostenibilità economica, sociale e ambientale della moderna agricoltura.

Quantunque ogni singola attività portata avanti con la Tesi abbia richiesto specifiche e approfondite ricerche e applicazioni di alto livello, l'avvento della pandemia Covid, rendendo difficoltosi taluni passaggi sperimentali, ha notevolmente dilazionato i risultati finali, impedendo la produzione in itinere di pubblicazioni di rilievo come avremmo voluto. La loro importanza operativa ci ha indotto comunque a pubblicare certi risultati pratici in riviste divulgative, che sono state di indubbio aiuto per gli operatori del settore. La valenza scientifica e tecnologica dei risultati, la relativa spiccata innovatività e l'indubbio impatto che essi avranno nell'operatività agricola nel nostro Paese, facilmente trasferibile anche all'estero, permetteranno indubbiamente di poter onorare questa pubblicazione con lavori specifici su Riviste scientifiche di rilievo, anche internazionali.

10.6 Bibliografia

Anonimo. (2020). Il Green Deal europeo e la PAC: per un'Europa sostenibile e climaticamente neutrale. (p. 55).

- Anselmi, A., Caruso, G., Cola, G., Gucci, R., Meriggi, P., Rossi, V., Sandali, P., Scaramozzino, N., & Servili, M. (2017). Un sistema di supporto alla gestione dell'oliveto. *Olivo e Olio*, 5, 28–32.
- Anselmi, A., & Legler, S. E. (2021). Un'app innovativa per la taratura delle irroratrici. *L'Informatore Agrario*, 2, 46–49.
- Biedermann, R. (2003). Aggregation and survival of *Neophilaenus albipennis* (Hemiptera: Cercopidae) spittlebug nymphs. *European Journal of Entomology*, 100(4), 493–499. <https://doi.org/10.14411/eje.2003.075>
- Bonatti, L., Di Vincenti, C., Guerrieri, P., Magliano, G., Masera, L., Melani, M., Paganetto, L., Perissich, R., & Quintieri, B. (2020). Europa e sfide globali. La svolta del green deal e del digitale. Eurilink University Press, 29–44.
- Caffi, T., Legler, S. E., & Rossi, V. (2016). L'applicazione dei sistemi di supporto alle decisioni nella moderna difesa integrata delle colture. In *Edagricole-New Business Media* (Ed.), *Difesa sostenibile delle colture* (pp. 171–190). Battilani, P.
- Cornara, D., Bosco, D., & Fereres, A. (2018). *Philaenus spumarius*: when an old acquaintance becomes a new threat to European agriculture. *Journal of Pest Science*, 91(3), 957–972. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0966-0>
- Cornara, D., Saponari, M., Zeilinger, A. R., de Stradis, A., Boscia, D., Loconsole, G., Martelli, G., Almeida, R. P. P., & Porcelli, F. (2017). Spittlebugs as vectors of *Xylella fastidiosa* in olive orchards in Italy. *Journal of Pest Science*, 90(2), 521–530.
- Dongiovanni, C., Cavalieri, V., Bodino, N., Tauro, D., Di Carolo, M., Fumarola, G., Altamura, G., Lasorella, C., & Bosco, D. (2019). Plant Selection and Population Trend of Spittlebug Immatures (Hemiptera: Aphrophoridae) in Olive Groves of the Apulia Region of Italy. *Journal of Economic Entomology*, 112(1), 67–74. <https://doi.org/10.1093/jee/toy289>
- European Parliament. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Union.
- European Parliament. (2009a). Directive 2009/127/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 amending Directive 2006/42/EC with regard to machinery for pesticide application. Official Journal of the European Union.

- European Parliament. (2009b). Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. *Official Journal of the European Union*, 309.
- European Parliament. (2016). Regulation (EU) 2016/2031 of the European Parliament of the Council of 26 October 2016 on protective measures against pests of plants, amending Regulations (EU) 228/2013,(EU) 652/2014 and (EU) 1143/2014 and repealing Council Directives 69/464/EEC, 74/647/. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32016R2031>
- Gil, E., Arnó, J., Llorens, J., Sanz, R., Llop, J., Rosell-Polo, J. R., Gallart, M., & Escolà, A. (2014). Advanced technologies for the improvement of spray application techniques in Spanish viticulture: An overview. *Sensors (Switzerland)*, 14, 691–708.
- Gil, E., & Escolà, A. (2009). Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 25(2), 145–152.
- Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A., & Rosell-Polo, J. R. (2013). Variable rate sprayer. Part 2 - Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 95, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.010>
- Leffelaar, P. A., & Ferrari, T. J. (1989). Some elements of dynamic simulations. In R. Rabbinge, S. A. Ward, & H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and systems management in crop protection* (pp. 19–45).
- Madden, L. V., Hughes, G., & Bosch, F. V. D. (2007). *The Study of Plant Disease Epidemics*. The American Phytopathological Society. <https://doi.org/https://doi.org/10.1094/9780890545058>
- Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Rodríguez-Lizana, A., Cuenca, A., Gil, E., Blanco-Roldán, G. L., & Gil-Ribes, J. A. (2016). Assessing the optimal liquid volume to be sprayed on isolated olive trees according to their canopy volumes. *Science of the Total Environment*, 568, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.013>
- Moral, J., Agustí-Brisach, C., Raya, M. C., Jurado-Bello, J., López-Moral, A., Roca, L. F., Chattaoui, M., Rhouma, A., Nigro, F., Sergeeva, V., & Trapero, A. (2021). Diversity of colletotrichum species associated with olive anthracnose worldwide. *Journal of Fungi*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/jof7090741>

- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(3), 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038
- Rossi, V., Giosuè, S., & Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In E. Oerke, R. Gerhards, G. Menz, & R. A. Sikora (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 241–258). Springer: Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9>
- Rüegg, J., Viret, O., & Raisigl, U. (1999). Adaptation of spray dosage in stone-fruit orchards on the basis of tree row volume. *EPPO Bulletin*, 29(1–2), 103–110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1999.tb00803.x>
- Sutton, T. B., & Unrath, C. R. (1984). Evaluation of the Tree-Row-Volume Concept with Density Adjustments in relation to Spray Deposits in Apple Orchards. *Plant Disease*, 68(6), 480–484.
- Tetro, T. (2020). Progetto green salva colture, al via "Biocontrollo e innovazione digitale. Agronotizie. <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/difesa-e-diserbo/2021/12/27/progetto-green-salva-culture-al-via-biocontrollo-e-innovazione-digitale/73641>
- Valeri, S. (2021). L'Unione europea ha approvato la nuova Politica Agricola Comune. *L'indipendente*. <https://www.lindipendente.online/2021/11/25/lunione-europea-ha-approvato-la-nuova-politica-agricola-comune/>
- Viret, O., Dubuis, P.-H., Bloesch, B., Fabre, A.-L., & Dupuis, D. (2010). Dosage des fongicides adapté à la surface foliaire en viticulture : efficacité de la lutte. *Revue Suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 42(4), 226–233.
- Viret, O., Siegfried, W., Bloesch, B., Tailens, J., & Mittaz, C. (2007). Dosage des fongicides adaptés à la surface foliaire: résultats en 2006. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture*, 39(1), 65–70.
- Vos, S., Camilleri, M., Diakaki, M., Lázaro, E., Parnell, S., Schrader, G., & Vicent, A. (2019). Pest survey card on *Xylella fastidiosa*. *EFSA Supporting Publications*, 16(6). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.en-1667>