

Recenti sviluppi nelle strategie di protezione delle colture dalle avversità

¹ *Dipartimento di Agraria e Nucleo di Ricerca sulla Desertificazione, Università degli Studi di Sassari*

² *Accademia dei Georgofili*

RIASSUNTO

La fitoiatria, ovvero la disciplina che si occupa della prevenzione, diagnosi e cura delle malattie delle piante, gioca un ruolo essenziale nel garantire la sicurezza alimentare globale, proteggere l'ambiente e adottare pratiche agricole sostenibili. Stanti la crescita della popolazione mondiale e i cambiamenti climatici che sconvolgono gli ecosistemi, l'importanza di garantire protezione alle colture dalle avversità biotiche e abiotiche diventa sempre più urgente. Per millenni l'agricoltura si è affidata ad una molteplicità di tecniche volte a combattere le minacce rappresentate dalle fitopatie. Grazie al rapido avanzamento delle conoscenze scientifiche e delle nuove tecnologie, le misure di protezione si sono evolute enormemente negli ultimi anni. Questo sintetico resoconto intende fare il punto sui recenti sviluppi nella protezione delle piante. Dopo una breve trattazione dei metodi tradizionali, verranno presi in considerazione i progressi tecnologici e le tendenze future, con particolare attenzione alle pratiche sostenibili, alle biotecnologie e alla gestione integrata dei parassiti (IPM). Saranno riassunte anche le sfide poste dai cambiamenti climatici, dalla comparsa di resistenza ai fitofarmaci nelle popolazioni dei patogeni e dagli ostacoli normativi.

ABSTRACT

Plant protection, i.e. the discipline devoted to preventing, diagnosing, and treating plant diseases, plays a key role in global food security, environmental protection, and the development of sustainable agriculture. As the world's population grows and climate change disrupts ecosystems, shielding crops from biotic and abiotic stresses becomes ever more urgent. For millennia, farmers have applied diverse techniques to cope with plant-disease threats. With rapid advances in science and technology, protective measures have expanded markedly in recent decades. This concise overview highlights major developments in plant protection: after a short review of traditional methods, it considers technological progress and future trends, with special attention to sustainable practices, biotechnology, and integrated pest management. It also summarizes the challenges linked to climate change, the emergence of pesticide resistance in pathogen populations, and regulatory hurdles.

1. LA PROTEZIONE DELLE PIANTE NELLA MODERNA AGRICOLTURA

1.1 Il contesto storico

Il ruolo cardine della protezione delle piante è riconosciuto fin dagli albori dell'agricoltura: già nell'antico Egitto, ad esempio, venivano impiegate pratiche quali la sommersione, la rotazione colturale e l'uso dello zolfo per contenere lo sviluppo degli organismi nocivi. Nel tempo, con l'espansione dell'agricoltura e l'aumento del numero di specie coltivate, è apparsa evidente la necessità di approcci più sistematici per la gestione dei parassiti e dei patogeni. A partire dal secondo dopoguerra, i fitofarmaci di sintesi sono emersi quali principali protagonisti nel “grande balzo in avanti” della protezione delle piante. Questi composti hanno offerto uno strumento potente per combattere gli organismi nocivi che minacciavano le colture. Tuttavia, l'uso di agrofarmaci su larga

scala ha portato a gravi conseguenze, tra cui l'inquinamento ambientale, la selezione di popolazioni dei patogeni e dei fitofagi resistenti e i potenziali effetti dannosi sugli organismi non bersaglio.

1.2 L'importanza economica ed ecologica della protezione delle piante

Gli interessi economici legati alla protezione delle piante sono indiscussi. Secondo le stime della Food and Agriculture Organization (FAO), fino al 40% dei raccolti viene perso ogni anno a causa di attacchi da parte di artropodi, microrganismi fitopatogeni ed erbe infestanti durante la coltivazione o nelle fasi di post-raccolta. Queste perdite hanno un impatto diretto sulla sicurezza alimentare globale, poiché la domanda di cibo continua ad aumentare, insieme all'espansione della popolazione mondiale. L'importanza della protezione delle piante non è solo economico-sociale, ma anche ecologica: i parassiti e i patogeni delle colture possono decimare interi ecosistemi, interferire con le catene alimentari e contribuire alla perdita di biodiversità. Non bisogna mai dimenticare che l'agricoltura è intrinsecamente legata alla salute degli ecosistemi, così anche le pratiche di protezione delle piante devono essere bilanciate attentamente al fine di evitare effetti dannosi sull'ambiente. L'uso indiscriminato di agrofarmaci ha sollevato non poche preoccupazioni riguardo alla salute del suolo, alla contaminazione delle acque e all'impatto negativo sugli organismi utili, *in primis* gli insetti impollinatori. Ciò ha creato giustificate preoccupazioni da parte dei decisori politici, dei gruppi ambientalisti e dei consumatori, spingendo l'agroindustria a sviluppare approcci alternativi e meno impattanti per il contenimento dei fitopatogeni.

Oltre alla necessità di ridurre l'impatto ambientale, la moderna fitoiatria affronta diverse sfide che rendono sempre più difficile la lotta contro le avversità. Uno dei principali problemi è rappresentato dallo sviluppo della resistenza: nel tempo, molte specie di patogeni hanno selezionato resistenze ai fitofarmaci più comunemente usati, riducendone o annullandone l'efficacia e obbligando così al ricorso a nuovi principi attivi o a nuove strategie di lotta. Fin dal 2006, nell'Unione Europea, l'uso di antibiotici in agricoltura è stato - molto opportunamente - vietato, a causa del rischio che i caratteri di resistenza potessero venire trasmessi orizzontalmente dai batteri fitopatogeni a quelli di interesse clinico. Oggi, autorevoli evidenze scientifiche indicano che anche nei funghi i fattori che regolano la resistenza a determinati fungicidi possano essere trasmessi da un ceppo all'altro, aumentando il rischio di selezionare popolazioni resistenti tra i più importanti patogeni fungini dell'uomo, responsabili di infezioni localizzate o sistemiche, spesso letali, in pazienti immunocompromessi. Molti ricercatori sono dell'opinione che tali evidenze porteranno, nel giro di pochi anni, al bando dell'uso di fungicidi oggi largamente impiegati in agricoltura (come, ad esempio, gli inibitori della biosintesi dell'ergosterolo), in quanto principi attivi aventi lo stesso meccanismo di azione sono utilizzati anche nella terapia delle micosi umane e veterinarie.

2. I METODI TRADIZIONALI DI PROTEZIONE DELLE PIANTE

2.1 Le pratiche colturali

Prima dell'impiego diffuso degli agrofarmaci di sintesi, gli agricoltori si affidavano a pratiche colturali e metodi tradizionali per gestire gli organismi nocivi. La rotazione delle colture, ad esempio, è uno dei metodi più antichi ed efficaci di contenimento di molte avversità biotiche: alternando le specie coltivate da una stagione all'altra, è possibile interrompere i cicli vitali dei parassiti che sono specifici per determinate colture. Questa pratica riduce l'accumulo di patogeni che prosperano sui sistemi monocolturali e concorre a promuovere la salute del suolo, prevenendo il depauperamento degli elementi nutritivi. Oltre alla rotazione, l'uso di colture intercalari, ovvero la pratica di coltivare insieme specie diverse, può aiutare a rallentare la diffusione dei parassiti. Alcune piante respingono naturalmente i parassiti o attirano gli insetti utili, creando un ecosistema più equilibrato all'interno dell'ambiente agricolo: è noto, ad esempio, che piantare specie di *Tagetes* accanto alle colture ortive

può aiutare a ridurre gli attacchi da parte di nematodi, grazie alle sostanze tossiche o repellenti rilasciate da queste piante. Attraverso la cosiddetta tecnologia del “*push-pull*”, invece, si utilizza una coltura intercalare “repellente” (*push*) per allontanare i parassiti dalla coltura principale e una coltura “trappola” (*pull*), piantata al bordo del campo, per attirare e intrappolare i parassiti. Questa pratica agroecologica impiega piante che rilasciano segnali semiochimici per respingere i parassiti dalla coltura principale, attirandoli al contempo verso la coltura trappola, utilizzata di norma come foraggio per gli animali.

2.2 La lotta biologica

I metodi di contenimento biologico (noti anche come “lotta biologica”) sono stati a lungo utilizzati per gestire i parassiti delle piante. Tali metodi prevedono l'introduzione o il potenziamento dei nemici naturali dei parassiti, come predatori, micoparassiti o competitori. Ad esempio, l'uso delle coccinelle per contenere le popolazioni di afidi è una ben nota strategia di lotta biologica. Allo stesso modo, l'applicazione di nematodi entomopatogeni può ridurre la sopravvivenza delle larve di insetti che vivono nel suolo. Negli ultimi anni, si è assistito ad un rinnovato interesse per la lotta biologica, in particolare attraverso l'impiego di predatori naturali e parassitoidi, che mirano a parassiti specifici senza danneggiare altri organismi. I progressi nella ricerca hanno portato a una migliore comprensione di queste interazioni, e i ricercatori stanno identificando sempre nuovi nemici naturali dei fitofagi, che vengono applicati nei più disparati sistemi colturali.

Oltre ai predatori e ai parassitoidi, grandi progressi sono stati fatti nell'uso di agenti di contenimento biologico di origine microbica: batteri benefici, funghi e virus che possono essere applicati alle colture per combattere patogeni o parassiti dannosi. *Bacillus thuringiensis*, ad esempio, è stato utilizzato come insetticida microbico per decenni, ma ora si stanno selezionando nuove varianti di questo batterio dotate di migliore efficacia contro una gamma più ampia di parassiti e una aumentata persistenza nell'ambiente. Analogamente, i funghi entomopatogeni - funghi che infettano gli insetti dannosi e li utilizzano come fonte di nutrimento - hanno suscitato molto interesse quali strumenti di contenimento biologico. Questi microrganismi antagonisti offrono diversi vantaggi, tra cui di recente è stata messa in luce la capacità di colonizzare la pianta come endofiti, stimolandone la resistenza anche nei confronti di virus, batteri, funghi e oomiceti fitopatogeni. Anche il genere fungino *Trichoderma*, che comprende numerose specie in grado di proteggere le piante attraverso meccanismi diversi (micoparassitismo, competizione, produzione di antibiotici e induzione di resistenza nelle piante trattate), si è imposto come il fungo antagonista per eccellenza nella lotta biologica contro i microrganismi fitopatogeni.

2.3 La lotta chimica

L'uso di metodi di contenimento chimico ha rappresentato la pietra miliare dell'agricoltura moderna da oltre un secolo. Gli agrofarmaci di sintesi, tra cui insetticidi, erbicidi, oomicetocidi e fungicidi, hanno consentito agli agricoltori di proteggere le colture da una vasta gamma di patogeni, aumentando drasticamente i raccolti e riducendo le perdite. Tuttavia, come già accennato, l'uso estensivo di prodotti di sintesi ha sollevato molte preoccupazioni sulla loro sicurezza e sull'impatto ambientale. I fitofarmaci possono contaminare il suolo e le acque, e il loro uso improprio ha contribuito alla selezione di popolazioni di parassiti resistenti a molti principi attivi. Inoltre, i fitofarmaci possono colpire anche gli organismi benefici, tra cui gli impollinatori, gli insetti predatori, la microflora utile, portando a gravi squilibri negli ecosistemi. In risposta a queste preoccupazioni, si è assistito ad un forte impulso allo sviluppo di soluzioni più mirate ed ecosostenibili. Le nuove classi di fitofarmaci, come ad esempio quelle che comprendono gli inibitori di crescita degli insetti o alcuni fungicidi sito-

specifici, sono progettate per essere più definite nella loro azione, riducendo il rischio di resistenza e minimizzando i danni agli organismi non bersaglio.

3. LE MODERNE TECNOLOGIE DI PROTEZIONE DELLE PIANTE

3.1 *Il ruolo delle biotecnologie*

Le biotecnologie hanno, ormai da alcuni decenni, rivoluzionato la protezione delle colture, permettendo la selezione di piante geneticamente modificate (GM) resistenti ai parassiti. Le colture geneticamente ingegnerizzate, come il cotone Bt e il mais Bt, contengono geni provenienti dal batterio *Bacillus thuringiensis*, che producono proteine tossiche per specifici insetti fitofagi. Queste colture hanno consentito di ridurre drasticamente il ricorso ad insetticidi, riducendo l'impatto ambientale e portando, in alcuni casi, ad un netto miglioramento della qualità dei raccolti. Oltre alla resistenza agli insetti fitofagi, le biotecnologie sono state anche applicate per sviluppare **colture resistenti a diverse malattie virali e fungine** [APPROFONDIMENTO I pag. 9]. Ad esempio, è stata selezionata una varietà di papaya (nota come "Rainbow") geneticamente modificata per resistere al virus della maculatura anulare, che un tempo devastava le piantagioni di papaya nelle Isole Hawaii. Un altro sviluppo all'avanguardia nella protezione delle piante è l'uso della tecnologia di editing genetico CRISPR-Cas9 per creare colture con resistenza integrata a parassiti e malattie. L'approccio di editing consente, infatti, di operare modifiche precise al codice genetico delle piante, rendendo possibile introdurre tratti specifici, come la resistenza a patogeni, senza la necessità di ricorrere all'inserimento di geni provenienti da specie diverse.

3.2 *Lo sviluppo di nuovi fitofarmaci*

Sebbene vi sia un crescente interesse per i metodi non chimici di protezione delle piante, i fitofarmaci di sintesi rimangono uno strumento essenziale nell'agricoltura. I recenti progressi nello sviluppo di nuove molecole si sono concentrati sulla creazione di prodotti chimici più mirati e meno tossici, che abbiano minore probabilità di danneggiare l'ambiente. Le nuove formulazioni di fitofarmaci sono progettate per essere più efficaci a dosi inferiori, riducendo la quantità complessiva di sostanze chimiche necessarie per contenere le popolazioni di patogeni. Oltre ai tradizionali agrofarmaci, i cosiddetti "biofitofarmaci" hanno guadagnato popolarità negli ultimi anni: questi includono i già citati insetticidi microbici, fitofarmaci di origine naturale e trappole a base di feromoni, che mirano a sconvolgere i comportamenti riproduttivi dei parassiti. Ad esempio, i **feromoni sintetici** possono essere utilizzati per interrompere la fase di accoppiamento degli insetti, riducendo la popolazione di parassiti senza danneggiare altri organismi [APPROFONDIMENTO II pag. 10].

Un interessante parallelo con la chimica ecologica, in cui i segnali olfattivi, quali feromoni e allelodoni, sono impiegati per manipolare il comportamento degli insetti bersaglio, è offerto dalla **biotremologia**, disciplina che studia le interazioni tra organismi mediate da vibrazioni nei substrati solidi, una comunicazione diffusa tra gli insetti e recentemente esplorata come strumento sostenibile per la gestione dei parassiti [APPROFONDIMENTO III pag 11].

3.3 *I progressi nel miglioramento degli antagonisti microbici*

Negli ultimi anni, la lotta biologica ha vissuto una vera e propria rinascita, che vede moltissimi ricercatori impegnati nell'esplorazione di approcci innovativi per potenziare i meccanismi naturali di contenimento dei parassiti. Per gli insetti fitofagi invasivi, la lotta biologica classica, basata sull'introduzione di antagonisti naturali (predatori o parassitoidi) provenienti dall'area d'origine, rappresenta una strategia chiave per ridurre stabilmente le popolazioni al di sotto della soglia di danno. Tuttavia, prima di impiegare qualsiasi agente biologico di lotta, è indispensabile valutarne,

oltre all'efficacia, i possibili **effetti indesiderati** su organismi non-target, al fine di evitare impatti negativi su specie protette o indigene [APPROFONDIMENTO IV pag. 13].

Un'area strategica di sviluppo - sia pur ancora molto dibattuta - riguarda l'uso di antagonisti geneticamente modificati. Ad esempio, sono stati ingegnerizzati insetti predatori o parassitoidi, conferendo loro migliori capacità di colpire parassiti specifici. Questi organismi modificati possono essere introdotti nelle colture per aiutare a contenere le popolazioni di parassiti con maggiore precisione ed efficacia rispetto ai predatori naturali tradizionali. L'ingegneria genetica potrebbe aumentare la loro specificità nei confronti degli organismi nocivi senza danneggiare gli organismi benefici, o far sì che le popolazioni degli antagonisti non raggiungano livelli soglia potenzialmente in grado di alterare gli equilibri tra le diverse componenti della microflora.

In un'ottica di gestione degli insetti dannosi che integri diverse tecniche a basso impatto ambientale, una delle proposte più innovative è rappresentata dal **controllo simbiotico**, un approccio basato sull'ampia varietà di relazioni simbiotiche esistenti in natura tra insetti e microrganismi [Approfondimento V pag. 15].

Le più recenti ricerche condotte sui suoli "repressivi" (suoli in cui, benché coesistano i tre vertici del cosiddetto "triangolo della malattia", e cioè la pianta ospite suscettibile, il patogeno virulento e le condizioni ambientali favorevoli, una determinata malattia non si sviluppa) hanno evidenziato come i **consorzi microbici** risultino spesso più efficaci rispetto ai singoli agenti di contenimento biologico, favorendo una prospettiva più ecologica delle interazioni tra pianta e patogeno [APPROFONDIMENTO VI pag. 17].

3.4 L'agricoltura di precisione e le tecniche di monitoraggio

L'agricoltura di precisione sta trasformando il modo in cui vengono gestite le malattie delle colture, utilizzando tecnologie avanzate per monitorare la salute delle piante e l'evoluzione delle popolazioni di parassiti in tempo reale. Droni, satelliti e sensori vengono utilizzati per raccogliere dati su fattori come l'umidità del suolo, lo stato di salute delle piante e i livelli di infestazione da fitofagi. Questi dati vengono quindi analizzati utilizzando l'intelligenza artificiale e algoritmi di *machine learning* per prevedere i focolai di infezione e ottimizzare le strategie di contenimento. Una promettente innovazione nel monitoraggio dei parassiti è rappresentata dall'uso delle tecnologie di telerilevamento, che consentono di identificare le infestazioni e i sintomi di malattie con una precisione straordinaria, utilizzando immagini ad alta risoluzione e analisi spettrali. Questi approcci consentono ai fitoiatri di rilevare i problemi in una fase precoce, favorendo interventi mirati che riducono l'uso di fitofarmaci e il relativo impatto sull'ambiente. L'avvento di queste tecnologie sta anche migliorando l'efficienza dei sistemi di Gestione Integrata dei Parassiti (*Integrated Pest Management* o IPM): combinando dati in tempo reale con **modelli predittivi**, l'IPM può diventare ancora più dinamico e reattivo [APPROFONDIMENTO VII pag. 19]. In luogo di applicazioni di fitofarmaci generalizzate, gli agricoltori possono adattare le loro strategie di protezione in base alle reali necessità delle colture, riducendo così i costi e minimizzando gli effetti collaterali.

3.5 Il ruolo dell'Intelligenza Artificiale e dell'Apprendimento Automatico

Una delle aree più promettenti nello sviluppo della protezione delle piante è l'integrazione delle tecnologie di intelligenza artificiale (IA) e di apprendimento automatico. Questi strumenti stanno rivoluzionando la gestione dei patogeni, consentendone il monitoraggio, la previsione degli scoppi epidemici e l'assunzione di decisioni sempre più puntuali e accurate. In luogo di fare affidamento sull'esperienza umana, che può essere limitata o influenzata da fattori soggettivi, i sistemi basati sull'IA possono analizzare enormi quantità di dati raccolti tramite sensori, immagini satellitari e droni per identificare schemi e prevedere le epidemie di parassiti prima che queste si verifichino. Tale

capacità predittiva consente agli agricoltori di adottare misure proattive, riducendo la necessità di applicazioni generalizzate di fitofarmaci e minimizzando le perdite di raccolto. Gli algoritmi di apprendimento automatico (in particolare i metodi di *deep learning* basati sui *Convolutional Neural Networks* e sui *Visual Transformers*) stanno anche migliorando la precisione nell'identificazione dei fitopatogeni o dei sintomi da essi causati sulla pianta. Ciò aumenta l'accuratezza degli interventi di contenimento dei parassiti e garantisce che vengano applicati precisamente solo dove necessario, migliorando la gestione delle risorse e riducendo le conseguenze ambientali negative. Ad esempio, alcuni sistemi di IA sono in grado di distinguere tra insetti dannosi e benefici negli agroecosistemi, consentendo il rilascio mirato di agenti di lotta biologica senza disturbare le specie utili. Analogamente, sistemi di riconoscimento di immagini basate sul *deep learning* sono ormai implementati in diverse app mobili per l'identificazione automatica di molte malattie fogliari sulle principali colture, consentendo di intervenire prontamente con i mezzi di difesa più adeguati alla specifica situazione. Questi sviluppi rappresentano un importante passo in avanti nella riduzione dell'impatto delle pratiche di difesa sugli organismi non bersaglio e nella promozione degli equilibri agroecologici.

4. I CAMBIAMENTI CLIMATICI E IL LORO IMPATTO SULLA PROTEZIONE DELLE COLTURE

4.1 *L'effetto dei cambiamenti climatici sul comportamento dei parassiti e dei patogeni*

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più significative che l'agricoltura moderna deve affrontare, e sta alterando le dinamiche del comportamento degli organismi patogeni. L'aumento delle temperature, il cambiamento nei modelli di distribuzione delle precipitazioni e l'aumento degli eventi meteorologici estremi stanno influenzando profondamente la diffusione e la frequenza degli attacchi di fitofagi. I climi più caldi permettono ai parassiti di prosperare in regioni dove fino a pochi decenni fa erano assenti, mentre le precipitazioni possono creare condizioni favorevoli alla diffusione di malattie, come le infezioni fungine, che sono altamente sensibili all'umidità. Ad esempio, le temperature più calde hanno facilitato, negli anni recenti, la diffusione dell'agente della ruggine del caffè in regioni dove, un tempo, questo patogeno non poteva sopravvivere. Allo stesso modo, molte malattie fogliari stanno diventando sempre più prevalenti, poiché le temperature più alte offrono un ambiente ideale per la proliferazione di questi patogeni. Le modificazioni del regime pluviometrico stanno anche influenzando la diffusione di malattie trasmesse dall'acqua, tra cui molte batteriosi, malattie fungine o causate da oomiceti, che prosperano in condizioni di elevata umidità. Gli eventi meteorologici estremi, come inondazioni o lunghi periodi di siccità, possono creare ambienti ideali per molti parassiti, in quanto sono causa di forte stress per le piante, rendendole più vulnerabili ai loro attacchi.

4.2 *Le colture resilienti e altre soluzioni di protezione delle piante in un clima che cambia*

In risposta a queste sfide, i ricercatori stanno sviluppando diverse *soluzioni basate sulla natura* (note come "Nature-based Solutions" o "NbS"), quali ad esempio le colture resilienti rispetto alle avverse condizioni ambientali, che possano resistere alla crescente pressione da parte di parassiti e malattie indotta dai cambiamenti climatici, o che risultino più tolleranti alle fluttuazioni di temperatura e alla siccità. La reintroduzione di alcune specie neglette o sottoutilizzate (*Neglected or Underutilised Species*, NUS), come il *teff*, il *fonio*, il miglio, il sorgo o l'*enset*, è considerata una delle strategie agroecologiche più promettenti, così come la selezione di specifici consorzi microbici in grado di promuovere l'adattamento delle piante a condizioni ambientali avverse. Ma anche i progressi nell'ingegneria genetica e nella tecnologia di editing CRISPR-Cas9 stanno giocando un ruolo sempre più importante nello sviluppo di colture resilienti al clima.

Inoltre, le strategie di protezione delle piante stanno evolvendo per integrare pratiche di “smart agriculture” rispetto al clima, che includano l'adattamento dei periodi di semina volti ad evitare i periodi di maggiore attività dei parassiti, l'uso di varietà resistenti alle malattie e l'impiego di sistemi di irrigazione di precisione che riducano il rischio di trasmissione di patogeni. Man mano che i cambiamenti climatici continueranno ad influenzare l'agricoltura globale, anche le misure di protezione delle piante dovranno adattarsi. Il futuro della protezione delle piante, verosimilmente, comporterà una combinazione di strumenti genetici avanzati, nuove tecnologie per il monitoraggio delle fitopatie e lo sviluppo di metodi di contenimento dei parassiti più resilienti rispetto alle variazioni climatiche. La già citata integrazione dell'intelligenza artificiale e dei big data nel prevedere i focolai di infezione sarà essenziale per mitigare l'impatto del cambiamento climatico sui sistemi colturali. Poiché i modelli climatici diventano sempre meno prevedibili, i sistemi di allerta precoce diventeranno sempre più importanti per agricoltori e tecnici, al fine di pianificare le strategie di contenimento dei danni, riducendo così le perdite di raccolto.

5. IL RUOLO DELLE POLITICHE E DELLE NORMATIVE NELLA PROTEZIONE DELLE PIANTE

5.1 *Gli standard globali e i quadri normativi*

La cooperazione internazionale e la collaborazione tra organismi di regolamentazione hanno svolto un ruolo chiave nel plasmare il futuro della protezione delle piante. Organizzazioni internazionali come l'European and Mediterranean Plant Protection Organisation (EPPO), la Food and Agriculture Organization (FAO) e l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) stabiliscono linee guida e standard per l'uso degli agrofarmaci, degli organismi geneticamente modificati e per l'applicazione dei protocolli diagnostici e dei metodi di protezione delle piante. Questi standard mirano a garantire che le misure di protezione delle piante siano sia efficaci che sicure per gli esseri umani e per l'ambiente.

Una delle principali iniziative normative è il Codice di Condotta Internazionale sulla Gestione dei Fitofarmaci (<https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/pesticide-risk-reduction/code-conduct/en/>) della FAO, che incoraggia i paesi a sviluppare le proprie politiche sui fitofarmaci basandosi sulle migliori pratiche internazionali. Esso fornisce un quadro per regolare l'uso dei fitofarmaci, monitorare i residui di fitofarmaci e promuovere lo sviluppo e l'uso di metodi alternativi di contenimento dei parassiti.

5.2 *Le politiche nazionali e regionali sulla protezione delle piante*

Le diverse regioni hanno politiche e normative distinte che governano la protezione delle piante, che variano in base alle condizioni ambientali locali, alle pratiche agricole e agli orientamenti dell'opinione pubblica nei confronti dei prodotti chimici e delle biotecnologie. Ad esempio, nell'Unione Europea esistono **normative** molto rigorose che regolano l'approvazione e l'uso degli agrofarmaci, ponendo un forte accento sulla riduzione della dipendenza dai fitofarmaci sintetici e sulla promozione della lotta biologica e delle pratiche di agroecologia [APPROFONDIMENTO VIII pag. 20]. In Nord America, Stati Uniti e Canada sono stati approvati quadri normativi volti a favorire le colture geneticamente modificate, concentrandosi sulla sicurezza degli OGM e promuovendone l'adozione. Tuttavia, il dibattito sugli OGM e sui loro potenziali impatti ecologici continua a influenzare le politiche agricole mondiali, in particolare nei Paesi in Via di Sviluppo, dove la regolamentazione è ancora in fase di evoluzione.

5.3 L'importanza della consapevolezza pubblica e della formazione

L'accettabilità delle strategie di protezione delle piante dipende non solo dall'innovazione scientifica, dall'efficacia, o dalla convenienza, ma anche dalla consapevolezza e dalla formazione del pubblico. Gli operatori agricoli e i consumatori devono essere edotti riguardo ai rischi e ai benefici connessi ai vari metodi di protezione delle piante, incluso l'uso appropriato dei fitofarmaci, degli agenti di contenimento biologico e degli OGM (inclusi gli organismi modificati mediante tecniche di gene editing). I governi e le organizzazioni non governative possono svolgere un ruolo importante nell'offrire programmi di formazione, risorse e iniziative di sensibilizzazione per favorire questi processi. Le campagne di sensibilizzazione pubblica sono fondamentali per promuovere tecniche agricole ecologiche, ridurre l'uso eccessivo di sostanze chimiche dannose e incoraggiare l'adozione dell'IPM. Inoltre, la formazione e la promozione dell'uso responsabile degli organismi geneticamente modificati e dei loro potenziali benefici - come ad esempio l'aumento della resistenza alle malattie - potrebbero aiutare a mitigare le preoccupazioni dei cittadini, in gran parte derivanti da una scarsa conoscenza delle tecnologie di miglioramento genetico oggi a disposizione. Colmare il divario di conoscenza tra la comunità scientifica e il grande pubblico appare essenziale per favorire discussioni informate e per orientare le decisioni politiche.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il mondo affronta oggi la grande sfida di dover nutrire una popolazione in continua crescita: in tale contesto, la salute delle piante rappresenta la chiave di volta per poter continuare a produrre il cibo sufficiente a nutrire l'umanità in un modo sostenibile. I cambiamenti climatici complicano ulteriormente il compito di garantire la sicurezza alimentare, ma allo stesso tempo stimolano l'innovazione nella fitoiatria. I recenti sviluppi nella messa a punto di misure di protezione delle piante stanno letteralmente trasformando il concetto di moderna fitoiatria. Innovazioni come l'editing genetico, l'intelligenza artificiale e i biofitofarmaci offrono soluzioni che non solo sono più efficaci nel contenimento dei patogeni, ma anche meno dannose per l'ambiente e per la salute umana. Come spesso accade, questi progressi incontrano degli ostacoli, tra cui si possono annoverare gli aspetti normativi, la percezione pubblica e la necessità di investimenti significativi in ricerca e sviluppo.

Il futuro della protezione delle piante probabilmente comporterà un approccio sempre più integrato, che combinerà il meglio delle tecniche tradizionali e di quelle moderne per arrivare a sviluppare una gestione sostenibile dei fitopatogeni. La IPM, che dà priorità all'uso di agenti di lotta biologica, di pratiche colturali agroecologiche e di prodotti chimici ecocompatibili, continuerà a essere una strategia fondamentale. Le tecnologie di editing genetico e l'agricoltura di precisione si evolveranno ulteriormente, offrendo modi più efficienti e mirati per proteggere le colture riducendo al minimo i danni ambientali. Il ruolo della politica, della formazione e della consapevolezza pubblica sarà altrettanto cruciale nel plasmare il successo di queste innovazioni. La collaborazione tra i settori scientifico, agricolo e normativo sarà essenziale per sviluppare e attuare strategie che bilancino le necessità di una adeguata produzione alimentare e l'obbligo morale di preservare per le future generazioni la piena salute degli agroecosistemi.

[APPROFONDIMENTO I]

Biotecnologie e Virologia Vegetale

Francesco Di Serio, Luisa Rubino

CNR - Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante

La lotta ai virus è tradizionalmente basata sull'utilizzo di varietà resistenti, sulla prevenzione mediante l'impiego di materiale vegetale di propagazione virus-esente e, quando possibile, sulla lotta ai vettori per contenere la diffusione naturale di questi agenti infettivi. Non esistono infatti prodotti chimici in grado di contrastare o curare un'infezione virale in pianta. I risultati ottenuti con piante geneticamente modificate per conferire resistenza alle infezioni virali sono stati incoraggianti, ma gli organismi geneticamente modificati (OGM) sono stati recepiti sfavorevolmente dai consumatori. Recentemente si stanno studiando mezzi di lotta alle virosi che permetterebbero di controllare le infezioni virali superando le problematiche legate agli OGM, in quanto non richiedono l'introduzione di geni esogeni nella pianta.

Un esempio è rappresentato dalla tecnologia dell'interferenza da RNA (RNAi), che si basa sulla capacità di RNA a doppia elica (dsRNA) di generare piccoli RNA in grado di guidare la degradazione specifica dell'RNA virale. I dsRNA presentano interessanti caratteristiche per la facilità di somministrazione per spray, ma hanno costi di produzione elevati e richiedono applicazioni frequenti per i ridotti tempi di persistenza sulla pianta causati da fattori ambientali, quali pioggia o radiazioni UV (Venu et al. 2024). Le nanotecnologie possono essere utilizzate per ottenere la stabilizzazione dei dsRNA grazie all'uso di nanoparticelle. Anche la tecnologia di editing CRISPR/Cas può essere applicata nel campo della virologia vegetale, permettendo l'inattivazione di geni di suscettibilità dell'ospite e l'instaurarsi di resistenza (Robertson et al. 2022).

Lo sviluppo di queste biotecnologie deve tener sempre in considerazione la capacità di mutazione dei virus, che ne minerebbe l'efficacia. Inoltre, è necessario che parallelamente vengano curati gli aspetti regolatori e legislativi, in linea con quanto avviene in EU.

Riferimenti bibliografici

- ROBERTSON G., BURGER J., CAMPA M. (2022): *CRISPR/Cas-based tools for the targeted control of plant viruses*. «Molecular Plant Pathology», 23, pp. 1701-1718.
- VENU E., RAMYA A., BABU P.L., SRINIVAS B., KUMAR S., REDDY N.K., BABU Y.M., MAJUMDAR A., MANIK S. (2024): *Exogenous dsRNA-mediated RNAi: mechanisms, applications, delivery methods and challenges in the induction of viral disease resistance in plants*. «Viruses», 17, pp. 49.

[APPROFONDIMENTO II]

I feromoni nella difesa delle colture

Andrea Lucchi

Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agro-ambientali, Università di Pisa

Gli insetti abitano un universo prevalentemente “olfattivo” nel quale molte importanti funzioni vitali sono mediate da sostanze odorose da essi stessi prodotte e percepite attraverso complessi apparati ghiandolari e sensoriali. Nei 66 anni trascorsi dall’identificazione del primo feromone “sessuale” in femmine di baco da seta, la ricerca ha posto le premesse perché tali sostanze possano essere oggi utilizzate come efficientissimi mezzi di monitoraggio e di contenimento per centinaia di specie di insetti di interesse agrario.

Per il **monitoraggio** si utilizzano trappole con fondo collato innescate con erogatori impregnati con un analogo sintetico del feromone sessuale, che comprende uno o più componenti della miscela feromonica naturale. Queste trappole “a feromoni” si configurano da decenni come uno strumento essenziale per la definizione e la realizzazione di opportune misure di controllo integrato. Per quanto riguarda l’impiego dei feromoni per il **contenimento**, notevole sviluppo hanno avuto negli ultimi anni diverse strategie che mirano a interferire con la comunicazione intraspecifica di una data specie (confusione sessuale, disorientamento, *attract & kill*, *lure & kill*, *push & pull*). Tra queste, la confusione sessuale (CS) è quella che si è affermata in tutto il mondo come efficace strumento di contenimento per insetti dannosi a colture arboree, orticole, floricole ed erbacee, sia in pieno campo che in coltura protetta. Il suo recente successo è stato favorito dallo sviluppo di un’ampia gamma di dispenser caratterizzati da un rilascio passivo o attivo, realizzati in plastica o in polimeri biodegradabili e con quantità giornaliere di feromoni rilasciate variabili, a seconda del comportamento dell’insetto target e delle condizioni ambientali.

Si stima che nel 2025 la CS sia stata applicata su circa 3 milioni di ettari a livello mondiale, principalmente per lepidotteri “chiave” della vite, delle foreste, delle pomacee, delle drupacee, del noce e delle ortive e, in misura minore, per insetti appartenenti a ordini diversi, tra cui gli emitteri.

Il principale limite nella diffusione su larga scala della CS è da ricercarsi sia nel costo del feromone di sintesi che nel lavoro necessario per l’installazione degli erogatori. I formulati ad aerosol, impiegabili solo in misura di alcune unità ad ettaro, assieme alla possibilità di inserire in un unico erogatore il feromone di specie diverse, quando queste insistano contemporaneamente sulla stessa coltura, possono contribuire ad una riduzione dei costi. Recenti acquisizioni che hanno reso possibile la sintesi di feromoni di insetti su scala industriale utilizzando ceppi di lievito geneticamente modificati potrebbero consentire di ridurre ulteriormente i costi di sintesi chimica a confronto con i metodi tradizionali.

Riferimenti bibliografici

- IORIATTI C., BAGNOLI B., LUCCHI A., VERONELLI V. (2004): *Vine moths control by mating disruption in Italy: results and future prospects*. «Redia», 87, pp. 117-128.
- IORIATTI C., LUCCHI A. (2016): *Semiochemical strategies for tortricid moth control in apple orchards and vineyards in Italy*. «Journal of Chemical Ecology», 42, pp. 571-583.
- BENELLI G., LUCCHI A., THOMSON D., IORIATTI C. (2019): *Sex pheromone aerosol devices for mating disruption: challenges for a brighter future*. «Insects», 10, pp. 308.
- BENELLI G., LUCCHI A. (2021): *From insect pheromones to mating disruption: theory and practice*. «Insects», 12, pp. 698.
- FRANCO J.C., COCCO A., LUCCHI A., MENDEL Z., SUMA P., VACAS S., MANSOUR R., NAVARRO-LLOPIS V. (2022): *Scientific and technological developments in mating disruption of scale insects*. «Entomologia Generalis», 42, pp. 251-273.

[Approfondimento III]

Biotremologia applicata: Il controllo dei parassiti con le vibrazioni

Valerio Mazzoni ¹, Rachele Nieri ^{2,3}

¹ Centro Ricerca e Innovazione, Fondazione Edmund Mach, San Michele all'Adige (TN)

² C3A - Centro Agricoltura Alimenti Ambiente, Università di Trento, San Michele all'Adige, Trento, Italy

³ Dipartimento di Matematica, Università di Trento, Povo, Trento, Italy

La biotremologia è la disciplina che studia le interazioni tra gli organismi mediate dalle vibrazioni che si propagano attraverso i substrati solidi, come il suolo, le piante o le strutture artificiali. Questa forma di comunicazione è estremamente diffusa nel regno animale, specialmente tra gli insetti, ma è stata a lungo trascurata dalla ricerca. Solo nell'ultimo decennio ha iniziato ad emergere come strumento promettente per la gestione sostenibile dei parassiti agrari. Si stima, infatti, che oltre 200.000 specie usino esclusivamente le vibrazioni per comunicare, spesso per scopi riproduttivi, territoriali o d'allarme. Molte di queste fanno parte dell'ordine Hemiptera, che include numerosi fitofagi chiave delle piante.

La biotremologia in questo contesto offre degli importanti paralleli con la chimica ecologica, dove i segnali olfattivi, quali feromoni e allelomoni, vengono impiegati per manipolare il comportamento degli insetti bersaglio. Analogamente, in biotremologia i segnali vibrazionali possono essere sfruttati per indurre risposte mirate. Questi segnali sono specie-specifici e devono essere percepiti nella loro integrità per espletare il loro ruolo biologico, tanto che recentemente una nuova terminologia è stata proposta per indicare i segnali vibrazionali: i "ferodoni" per quelli intraspecifici (es. segnali sessuali) e "allelodoni" per quelli interspecifici (es. segnali di deterrenza verso predatori). Il suffisso "-done" deriva dal greco "*doneo*" e significa "vibrare".

Strategie di Manipolazione Comportamentale

Le tecniche basate sulle vibrazioni del substrato si dividono in tre categorie principali, analoghe a quelle già impiegate con i semiochimici:

1. Interferenza. Questa strategia mira a prevenire o interrompere la comunicazione tra individui durante il processo di accoppiamento. Molti insetti, come le cicaline o le cimici, stabiliscono dei duetti vibrazionali per completare l'accoppiamento. La cosiddetta "confusione sessuale vibrazionale" consiste nel propagare delle vibrazioni di disturbo nelle piante ospiti degli insetti bersaglio per mascherare o confondere i segnali naturali di accoppiamento. Un esempio emblematico è il controllo della cicalina americana della vite, *Scaphoideus titanus*, vettore della flavescenza dorata. In questo caso si utilizzano vibrazioni di disturbo che imitano il segnale di rivalità maschile, emesso da maschi per interrompere altri duetti. In campo, le vibrazioni di disturbo sono trasmesse da emettitori di vibrazioni elettronici ('shaker') fissati ai pali del vigneto, a distanze variabili di 30-50 m, a seconda della dimensione e forma di allevamento delle piante. L'efficacia della tecnica dipende dalla copertura completa della vegetazione e dall'ampiezza del segnale, che deve essere sufficiente a mascherare i segnali naturali.

2. Attrazione/Promozione. Questa strategia utilizza segnali per indurre comportamenti desiderati, come la ricerca del partner o l'orientamento verso una trappola. Un esempio sono le trappole bimodali per le cimici che combinano un feromone di aggregazione (diffuso per via aerea) con un ferodone sessuale (trasmesso via substrato). Il feromone attrae gli individui a lungo raggio mentre il ferodone guida l'insetto dentro la trappola una volta atterrato nelle vicinanze. Tecnologie emergenti riguardano l'uso di sensori per identificare sulle piante le vibrazioni emesse spontaneamente da parassiti (monitoraggio passivo) o stimolandoli all'emissione con dei playback di segnali preregistrati (monitoraggio attivo).

3. Repellenza/Inibizione. Questa strategia usa le vibrazioni per simulare predatori o condizioni di stress e indurre i parassiti ad abbandonare la pianta o ridurre attività dannose. Un esempio sono i segnali che imitano l'avvicinamento di un predatore inducendo comportamenti di 'freezing' (immobilità) o 'dropping' (abbandono della pianta) nelle prede. Vibrazioni di disturbo possono anche alterare significativamente il foraggiamento con conseguente riduzione di fitness e con potenziali ricadute sulle capacità di fungere da vettori di fitopatie. Queste applicazioni rientrano nel tema dell'ecologia della paura ("ecology of fear") e hanno trovato riscontri importanti nel controllo degli aleurodidi delle serre, dove l'uso combinato di vibrazioni di disturbo e bioinsetticidi ha mostrato un'efficacia maggiore rispetto a prodotti convenzionali.

Riferimenti bibliografici

- BERARDO A., FATTORUSO V., MAZZONI V., PUGNO N.M. (2022): *Coupling computational vibrational models and experimental biotremology to develop a green pest control strategy against the greenhouse whitefly Trialeurodes vaporariorum*. «Journal of the Royal Society Interface», 19, 20220311.
- MAZZONI V., ANFORA G., COCROFT R.B., FATOUROS N.E., GROOT AT, GROSS J, HILL PS, HOCH H, IORIATTI C, NIERI R, PEKAS A. (2024): *Bridging biotremology and chemical ecology: a new terminology*. «Trends in Plant Science», 29, pp. 848-855.
- NIERI R., ANFORA G., MAZZONI V., STACCONI M.V.R. (2022): *Semiochemicals, semiophysics and their integration for the development of innovative multi-modal systems for agricultural pests' monitoring and control*. «Entomologia Generalis», 2021, pp. 167-183.
- PEKAS A., MAZZONI V., APPEL H., COCROFT R., DICKE M. (2024): *Plant protection and biotremology: fundamental and applied aspects*. «Trends in Plant Science», 29, pp. 32-39.
- STRAUSS J., STRITIH-PELJHAN N., NIERI R., VIRANT-DOBERLET M., MAZZONI V. (2021): *Communication by substrate-borne mechanical waves in insects: from basic to applied biotremology*. «Advances in Insect Physiology», 61, pp. 189-307.

[Approfondimento IV]

Utilizzo di Agenti di Controllo Biologico ed evoluzione delle strategie di contenimento degli organismi nocivi in agricoltura

Pio Federico Roversi

Istituto Nazionale di Riferimento per la Protezione delle Piante (CREA-DC)

E' sempre più diffusa la consapevolezza, nel mondo scientifico e nell'opinione pubblica, che per affrontare adeguatamente le sfide determinate dalle invasioni biologiche di specie aliene dannose all'agricoltura e alle foreste sarà necessario, da un lato investire in innovazioni tecnologiche per una agricoltura di precisione che utilizzi in modo attento le risorse naturali, acqua in primo luogo, dall'altro ridare la giusta attenzione alla difesa fitosanitaria delle colture, intesa in tutte le sue accezioni, così da unire in un'ottica moderna l'uso accorto dei mezzi della fitoiatria allo sviluppo di strumenti "antichi", come in primo luogo la lotta biologica con antagonisti naturali delle specie dannose.

Al riguardo si sta sempre più correttamente diffondendo la consapevolezza nell'opinione pubblica e nel mondo scientifico che per rispondere alle sfide derivanti dai danni causati da specie aliene dannose agli alberi, se da un lato dovrà crescere l'impegno per contrastare con maggiore efficacia nuovi indesiderati arrivi o riuscire a realizzare con la massima tempestività azioni di eradicazione sui focolai iniziali di nuovi agenti di danno ancora circoscritti, in gran parte dei casi nelle invasioni biologiche ormai conclamate sarà necessario indirizzare le energie verso l'utilizzo di antagonisti naturali, dando sempre più impulso, in modo consapevole e corretto, a programmi di lotta biologica.

Nel caso di organismi fitofagi come gli insetti, provenienti da altri areali e in grado di dare luogo nei territori di nuova colonizzazione a vere e proprie "invasioni biologiche" favoriti nella diffusione dalla mancanza di fattori biotici di contenimento delle loro popolazioni e dalla mancata coevoluzione con le piante colonizzate, il ricorso alla "Lotta Biologica Classica" con l'individuazione nei luoghi di origine del fitofago di efficaci antagonisti naturali (parassitoidi, predatori, entomopatogeni) e la loro introduzione nei nuovi ambienti, rappresenta in vari casi una strategia cardine per ricondurre in modo non estemporaneo questi organismi al di sotto della soglia di danno.

La drammaticità delle esplosioni numeriche di specie aliene si esplica peraltro in alcune situazioni in modo davvero devastante, ben oltre la riduzione o compromissione dei raccolti, soprattutto laddove venga determinata la distruzione degli ambienti colonizzati come stanno mostrando vari casi che interessano sistemi forestali e ambienti protetti.

Basti pensare a quest'ultimo riguardo alla progressiva desertificazione delle Pinete costiere di *Pinus pinea* L., il più iconico delle conifere delle coste italiane, ossatura primaria dei boschi che ricoprono molti tratti delle fasce a ridosso dei diversi mari che bagnano la Penisola e le principali isole del nostro Paese, oltre a costituire elemento paesaggistico di assoluto rilievo per città come Roma, Napoli, Bari. A tutto questo vanno poi aggiunte le conseguenze derivanti dalla scomparsa di habitat dove trovano rifugio specie animali protette dalla normativa nazionale e internazionale.

Laddove infatti dopo l'arrivo di organismi fitofagi a varia specializzazione trofica e capacità di colonizzare nicchie ecologiche diverse non si riuscirà a intervenire con la necessaria tempestività, che i casi di eradicazione richiedono per risultare davvero efficaci, la via primaria evidenziata dalle recenti esperienze di insetti che hanno rapidamente invaso il nostro Paese difficilmente potrà prescindere dall'applicazione del biocontrollo, al fine di evitare che decenni di attenzione alla produzione di cibi sempre più sani, cosa in cui l'agricoltura e il mondo della ricerca italiana hanno sviluppato risultati indiscutibili, finisca per subire un'inversione di rotta.

Al riguardo non deve essere tralasciato che, l'utilizzo degli agenti di controllo biologico per il contenimento di popolazioni nocive ha le sue basi nell'ecologia applicata e nello specifico negli studi

di dinamica di popolazione, che devono trovare adeguata considerazione negli studi preliminari ad ogni intervento in tale ambito.

Le specie alloctone dannose alle piante e ai prodotti agricoli, introdotte accidentalmente da altre Regioni del pianeta e successivamente insediatesi stabilmente nei nuovi territori fino a dare luogo a vere e proprie esplosioni numeriche, difficilmente possono essere controllate senza interventi mirati a ricostruire una rete di relazioni trofiche che rappresenta lo scopo principale cui mira la Lotta Biologica Classica, il cui obiettivo primario ben lungi dall'essere individuato nella distruzione di popolazioni, per quanto impattanti, si identifica invece nel contenimento delle specie in modo permanente al di sotto di predeterminate soglie di danno.

Gli interventi di lotta biologica realizzati per ripristinare situazioni di equilibrio di ecosistemi perturbati ricorrendo a strumenti a basso impatto ambientale non rappresentano però uno strumento di facile applicazione, al contrario richiedono fin nelle fasi degli studi preliminari metodologie d'indagine mutate proprio dall'ecologia applicata, un'esperienza specifica delle equipe scientifiche che predispongono gli studi di impatto e una rigorosa applicazione in contesti ambientali la cui gestione deve risultare compatibile con l'impiego e il permanere di organismi spesso sensibili all'uso di prodotti a largo spettro.

Quello che deve essere valutato prima di utilizzare agenti di controllo biologico, oltre all'efficacia nel contenere le popolazioni degli organismi dannosi alle piante, ponendo grande attenzione nei lavori sperimentali, è il rischio di ricadute indesiderate per organismi indigeni non-target, soprattutto per quelli inseriti nelle liste che raggruppano le specie a livelli diversi di protezione. Bisogna infatti verificare con tutto il rigore necessario, nel rispetto degli Standard internazionali definiti in primo luogo dalla FAO e dalla European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO), che l'azione degli agenti di controllo biologico che intendiamo usare, una volta liberati nell'ambiente non si indirizzi in modo prioritario e impattante verso altre specie di Insetti diverse da quella che vogliamo controllare.

Riferimenti bibliografici

AVILA G.A. (2024): *Pre-emptive biocontrol as a new tool to maximize preparedness for high-risk pests. Monografia "Biological control of threats to the biosecurity of agricultural and forestry systems: italian projects and innovative strategies"*. «Atti Accademia Nazionale Italiana di Entomologia», Anno LXXII, pp. 125-127.

FARAGLIA B.C., ROVERSI P.F. (2021): *La riorganizzazione del Servizio Fitosanitario Nazionale nel quadro delle nuove sfide per la difesa delle piante: il Decreto Legislativo 2 febbraio 2021, n. 19*. Accademia dei Georgofili, Notiziario INFO. <https://www.georgofili.info/contenuti/la-riorganizzazione-del-servizio-fitosanitario-nazionale-nel-quadro-delle-nuove-s/15543>

GIOVANNINI L., MAZZA G., SABBATINI PEVERIERI G., IOVINELLA I., MANCO B.N., PROSPER D., BLAISEB J., MAYB C., VANDENBERG N., MARIANELLI L., ROVERSI P.F. (2024): *Exploring potential biocontrol agents of the invasive scale Tumeiyella parvicornis (Hemiptera: Coccidae). Monografia "Biological control of threats to the biosecurity of agricultural and forestry systems: italian projects and innovative strategies"*. «Atti Accademia Nazionale Italiana di Entomologia», Anno LXXII, pp. 143-145.

ROVERSI P.F. (2021): *Il Rinascimento nella protezione delle piante. La nuova stagione di un corretto approccio al controllo delle specie invasive*. Libro Bianco del Verde 2021. Focus emergenza Pini: pp. 42-51.

SABBATINI PEVERIERI G., ROVERSI P.F. (2024): *The outputs of the classical biological control strategy to Halyomorpha halys in Italy. Monografia "Biological control of threats to the biosecurity of agricultural and forestry systems: italian projects and innovative strategies"*. «Atti Accademia Nazionale Italiana di Entomologia», Anno LXXII, pp. 129-131.

[APPROFONDIMENTO V]

Controllo simbiotico

Elena Gonella, Alberto Alma

Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari e AGROINNOVA Università di Torino

Nell'ottica di implementare piani di gestione degli insetti dannosi basati sull'integrazione di più tecniche a basso impatto ambientale, una delle proposte più recenti è il controllo simbiotico. Questo approccio si fonda sulla grande varietà di relazioni simbiotiche che intercorrono in natura tra insetti e microrganismi, che influenzano pesantemente la capacità delle diverse specie e dei singoli individui di mantenere elevate popolazioni in un determinato ambiente. La manipolazione di queste associazioni è pertanto in grado di modificare in maniera significativa la distribuzione e le capacità biologiche degli insetti, con interessanti implicazioni per il controllo delle specie dannose.

Il controllo simbiotico può essere articolato tramite diverse strategie, le più importanti delle quali includono la creazione di nuove associazioni con tratti favorevoli alla difesa delle colture, la distruzione delle associazioni obbligate per la soppressione degli insetti dannosi, e la manipolazione della riproduzione per limitare la produzione di progenie. La creazione di nuove associazioni prevede di introdurre un simbionte con caratteristiche desiderate per indurre un determinato fenotipo nell'ospite. Per quanto questa strategia possa essere utilizzata per introdurre fattori soppressivi per l'insetto e ridurre quindi le popolazioni, più frequentemente è stata proposta per ridurre o interrompere la capacità di trasmissione di un patogeno da parte di un insetto vettore, ad esempio introducendo simbionti con capacità antimicrobiche o antivirali. Questa strategia è stata proposta per diversi vettori di interesse medico-veterinario, ad esempio per impedire la trasmissione di protozoi come i plasmodi malarici o i tripanosomi oppure per contrastare la diffusione degli arbovirus trasmessi da zanzare. La creazione di nuove associazioni può prevedere la paratransgenesi, ovvero la modificazione genetica di un simbionte già associato all'insetto per esprimere nuovi fattori di interesse; tuttavia, questa tecnica non è mai stata applicata in Europa. L'introduzione di ceppi microbici naturali appare di più facile applicazione nei nostri contesti.

La distruzione delle associazioni obbligate è uno dei metodi più promettenti in agricoltura, in quanto può potenzialmente consentire un pronto impiego tramite l'uso di sostanze attive già disponibili in commercio, vale a dire prodotti ad azione antimicrobica capaci di sopprimere un simbionte: per questo motivo l'approccio è anche detto "lotta simbiotocida". Tuttavia, questo metodo può essere efficace solo su specie dannose che presentano caratteristiche biologiche ben precise, ovvero: i) un rapporto obbligato con un microrganismo simbionte; ii) una trasmissione transgenerazionale che prevede una fase di acquisizione del simbionte dall'ambiente; iii) la possibilità di raggiungere il simbionte con un trattamento simbiotocida durante la fase ambientale. Un esempio di applicazione di questo approccio è la lotta simbiotocida alla cimice asiatica *Halyomorpha halys*, condotta tramite l'eliminazione del batterio obbligato *Pantoea carbekii* dalla superficie delle uova dopo la deposizione e prima della schiusa, al fine di impedire l'acquisizione tramite ingestione del batterio rilasciato sulla superficie delle uova da parte delle neanidi neonate. Questo metodo è attualmente considerato parte integrante dei protocolli di gestione della cimice asiatica in alcune colture frutticole, come il nocciolo.

La manipolazione della riproduzione per limitare la produzione di progenie è condotta principalmente sfruttando l'azione del batterio *Wolbachia*, capace di indurre un meccanismo chiamato incompatibilità citoplasmatica nei propri ospiti al fine di favorire la propria diffusione all'interno delle uova delle femmine infette. Questo meccanismo blocca la produzione di progenie che deriva dall'accoppiamento tra un maschio infetto e una femmina non infetta. Questa strategia è applicabile con specie dannose che in natura non presentano l'infezione con *Wolbachia*: il rilascio nell'ambiente di linee maschili infettate in laboratorio con il batterio impedisce agli accoppiamenti che questi maschi effettueranno con le femmine di campo di produrre progenie, in maniera analoga a quanto previsto dalla tecnica dell'insetto sterile. Questo metodo, chiamato tecnica dell'insetto incompatibile, può avere successo solo se i maschi rilasciati non presentano significativi difetti nella competizione con quelli di campo. Un esempio di applicazione è la lotta alle zanzare vettori di arbovirus in diverse parti del mondo, dove rilasci programmati di maschi infettati da *Wolbachia* consentono un abbattimento delle popolazioni delle zanzare per alcuni anni; la ripetizione periodica dei lanci può garantire un controllo di lunga durata.

Riferimenti bibliografici

- ARORA A.K., DOUGLAS A.E. (2017): Hype or opportunity? *Using microbial symbionts in novel strategies for insect pest control*. «Journal of Insect Physiology» 103, pp. 10-17.
- HOFFMANN A. A., AHMAD N. W., KEONG W. M., LING C.Y., AHMAD N.A., GOLDING N., TIERNEY N., JELIP J., PUTIT P.W., MOKHTAR N., SANDHU S.S. (2024): *Introduction of Aedes aegypti mosquitoes carrying wAlbB Wolbachia sharply decreases dengue incidence in disease hotspots*. «iScience», 27, 2, 108942.
- HYDER M., LODHI A.M., WANG Z., BUKERO A., GAO J., MAO R. (2024): *Wolbachia interactions with diverse insect hosts: from reproductive modulations to sustainable pest management strategies*. «Biology», 13, p. 151.
- GONELLA E., ALMA A. (2023): *The role of symbiont-targeted strategies in the management of Pentatomidae and Tephritidae pests under an integrated vision*. «Agronomy» 13, p. 868.
- GONELLA E., ORRÙ B., MARASCO R., DAFFONCHIO D., ALMA A. (2020): *Disruption of host-symbiont associations for the symbiotic control and management of pentatomid agricultural pest - a review*. «Frontiers in Microbiology» 11, p. 547031.
- RATCLIFFE N.A., FURTADO PACHECO J.P., DYSON P., Castro H.C., Gonzalez M.S., Azambuja P., Mello C.B. (2022): *Overview of paratransgenesis as a strategy to control pathogen transmission by insect vectors*. «Parasites Vectors» 15, p. 112.

[APPROFONDIMENTO VI]

Comunità Microbiche Sintetiche

Sabrina Sarrocco

Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali, Università di Pisa

Le piante vivono in associazione con complesse comunità microbiche (*microbiota*) che influenzano positivamente la loro salute. Secondo l'ipotesi del *cry for help*, durante l'infezione da parte di un patogeno le piante reclutano microrganismi benefici per mitigare lo sviluppo della malattia (Rolfe et al., 2019). Parallelamente, i patogeni secernono effettori che facilitano la colonizzazione dell'ospite attraverso diversi meccanismi, tra cui la manipolazione mirata del microbiota vegetale (Kraege et al., 2025).

Da queste evidenze è emersa l'idea di progettare Comunità Microbiche Sintetiche (*SynCom*) per fornire una protezione duratura e adattabile alla pianta (Duran et al., 2018). Per anni si è creduto che un singolo isolato antagonista potesse rappresentare la “silver bullet” del controllo biologico (Vannacci e Sarrocco, 2018). Gli studi sui suoli soppressivi hanno dimostrato che i consorzi microbici superano spesso l'efficacia dei singoli agenti di biocontrollo, promuovendo una visione più ecologica delle loro interazioni con la pianta e il patogeno (Sarrocco, 2023).

Le *SynCom*, composte da 30-200 ceppi coltivabili, mirano a riprodurre le funzioni dei microbioti naturali. I consorzi multi-isolato mostrano spesso prestazioni superiori rispetto ai singoli isolati (Wang e Yi, 2022).

Nella progettazione di *SynCom* su misura i metodi di *machine learning* consentono di identificare i ceppi chiave responsabili di specifiche funzioni comunitarie (Herrera Paderes et al., 2018). Tuttavia, più le comunità sintetiche diventano complesse, maggiori sono le sfide bioinformatiche per la loro modellizzazione (Selten et al., 2025), tra cui comprendere i meccanismi genetici e biochimici che regolano le interazioni ospite–microbiota, soprattutto in condizioni di stress.

Riferimenti bibliografici

- DURÁN P., THIERGART T., GARRIDO-OTER R., AGLER M., KEMEN E., SCHULZE-LEFERT P., HACQUARD S. (2018): *Microbial interkingdom interactions in roots promote Arabidopsis survival*. «Cell», 175, pp. 973–983.
- HERRERA PAREDES S., GAO T., LAW T.F., FINKEL O.M., MUCYN T., TEIXEIRA P.J., SALAS GONZÁLEZ I., FELTCHER M.E., POWERS M.J., SHANK E.A., JONES C.D. (2018): *Design of synthetic bacterial communities for predictable plant phenotypes*. «PLOS Biology», 16, e2003962.
- KRAEGE A., PUNT W., DODDI A., ZHU J., SCHMITZ N., SNELDERS N.C., THOMMA B.P.H.J. (2025): *Undermining the cry for help: The phytopathogenic fungus Verticillium dahliae secretes an antimicrobial effector protein to undermine host recruitment of antagonistic Pseudomonas bacteria*. «bioRxiv», 2025.06.09.658588.
- ROLFE S.A., GRIFFITHS J., TON J. (2019): *Crying out for help with root exudates: adaptive mechanisms by which stressed plants assemble health-promoting soil microbiomes*. «Current Opinion in Microbiology», 49, pp. 73–82.
- SARROCCO S., VANNACCI G. (2018): *Preharvest application of beneficial fungi as a strategy to prevent postharvest mycotoxin contamination: a review*. «Crop Protection», 110, pp. 160-170.

- SARROCCO S. (2023): *Biological disease control by beneficial (micro)organisms: Selected breakthroughs in the past 50 years*. «Phytopathology», 113, pp. 732-740.
- SELTEN G., GÓMEZ-REPOLLES A., LAMOUCHE F., RADUTOIU S., DE JONGE R. (2025): *SyFi: generating and using sequence fingerprints to distinguish SynCom isolates*. «Microbial Genomics», 11, pp. 001461.
- YIN C., HAGERTY C.H., PAULITZ T.C. (2022): *Synthetic microbial consortia derived from rhizosphere soil protect wheat against a soilborne fungal pathogen*. «Frontiers in Microbiology», pp. 13:908981.

[APPROFONDIMENTO VII]

Modelli predittivi

Paola Battilani

Dipartimento di Scienze delle produzioni vegetali sostenibili, Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza

I modelli predittivi sono impiegati nella difesa delle colture da diversi anni e rappresentano un aiuto concreto nella previsione della comparsa delle malattie e del corretto momento di per gli interventi di difesa. Sono cruciali nel contesto IPM, utilizzando i dati meteorologici come principale input, ma possono includere anche l'effetto delle tecniche colturali e in un prossimo futuro potranno includere anche dati raccolti da remoto o con sensori. In tempi più recenti, sono stati sviluppati modelli predittivi anche per i funghi produttori di micotossine. Sono sostanze tossiche naturalmente presenti in vari prodotti vegetali quali mais, frumento e frutta secca. Comunemente, le contaminazioni non sono accompagnate da sintomi visibili, quindi è particolarmente importante prevedere la loro presenza. La gestione delle micotossine si basa essenzialmente sulla prevenzione, quindi l'impiego di modelli predittivi non ha, come per le altre avversità, lo scopo principale di guidare gli interventi di difesa, ma di prevedere il rischio di contaminazione, informazione cruciale per verificare il rispetto dei limiti di legge, e per ottimizzare il momento della raccolta e la gestione del prodotto in post raccolta. Limiti di legge che definiscono il contenuto massimo ammesso di micotossine, tra cui la più pericolosa è certamente l'aflatossina, sono definiti e molto restrittivi, soprattutto in Europa. Quindi, i prodotti non conformi non possono essere consumati ad uso alimentare, con regole più restrittive per l'uomo, ma in vigore anche per gli animali. Con i modelli predittivi si possono individuare le aree di rischio in ciascuna stagione colturale, e per ciascuna micotossina, ma anche prevedere gli scenari in relazione al cambiamento climatico. Quindi, i modelli predittivi sono un utile strumento per gli agricoltori, i tecnici, ma anche per chi deve definire strategie a medio e lungo termine per mitigare l'effetto del cambiamento climatico.

Riferimenti bibliografici

- CAMARDO LEGGIERI M., MAZZONI M., BATTILANI P. (2021): *Machine learning for predicting mycotoxin occurrence in maize*. «Frontiers in Microbiology», 12, art. no. 661132.
- CAMARDO LEGGIERI M., GIORNI P., PIETRI A., BATTILANI P. (2019): *Aspergillus flavus and Fusarium verticillioides interaction: modeling the impact on mycotoxin production*. «Frontiers in Microbiology», 10, art. no. 2653.
- BATTILANI P., TOSCANO P., VAN DER FELS-KLERX H.J., MORETTI A., CAMARDO LEGGIERI M., BRERA, C., RORTAIS A., GOUMPERIS T., ROBINSON T. (2016): *Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change*. «Scientific Reports», 6, art. no. 24328.
- BATTILANI P., CAMARDO LEGGIERI M. (2015): *Predictive modelling of aflatoxin contamination to support maize chain management*. «World Mycotoxin Journal», 8, pp. 161-170.
- BATTILANI P., CAMARDO LEGGIERI M., ROSSI V., GIORNI P. (2013): *AFLA-maize, a mechanistic model for Aspergillus flavus infection and aflatoxin B1 contamination in maize*. «Computers and Electronics in Agriculture», 94, pp. 38-46.
- EUROPEAN COMMISSION (2023): *Commission Regulation (EU) 2023/915*. «Official Journal of the European Union», 119, pp. 103-157.

[APPROFONDIMENTO VIII]

Agrofarmaci: aspetti regolatori

Gianfranco Romanazzi

Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari ed Ambientali, Università Politecnica delle Marche

Le piante sono esposte a fattori biotici e abiotici, che possono comprometterne la crescita, quantità e qualità della produzione, e talvolta la stessa sopravvivenza. Per quanto riguarda gli stress biotici, abbiamo a disposizione i prodotti per la protezione delle piante (*plant protection products*, PPP), o prodotti fitosanitari, la cui approvazione è definita dal Regolamento 2009/1107 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1107>). Nel caso in cui le piante siano affette da soli stress abiotici (eccessi o difetti della presenza di elementi nutritivi, temperatura, acqua, etc.), gli strumenti a disposizione ricadono nel Regolamento 2019/1009 relativo ai fertilizzanti (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009>), che include anche la categoria dei biostimolanti, che hanno la potenzialità di limitare gli stress abiotici. In questo ambito ci riferiremo ai prodotti fitosanitari, detti anche fitofarmaci, pesticidi (da chi li conosce poco) o agrofarmaci (per i tecnici del settore), devono seguire un lungo iter di approvazione, attualmente lungo anche 10-13 anni (dall'ideazione alla messa in commercio) e che può raggiungere costi di 300 milioni di Euro. Tale regolamento definisce i passaggi necessari per la registrazione di un prodotto fitosanitario, che di norma deve essere sottoposto a nuova registrazione ogni 10 anni. La stessa norma definisce agli articoli 22 e 23 due categorie particolari di prodotti fitosanitari, le sostanze a basso rischio (art. 22) e le sostanze di base (art. 23). Le sostanze a basso rischio comportano, come dice il termine, un basso rischio per la salute umana, animale e per l'ambiente, e pertanto devono essere sottoposte a nuova registrazione ogni 15 anni. Le sostanze di base sono rappresentate da composti utilizzati nell'alimentazione umana (*foodstuff*) e hanno un'attività secondaria nella protezione delle piante. Pertanto, non dovendo dimostrare che non nuocciono alla salute e all'ambiente, il costo di registrazione è molto più limitato (attorno a 50000 Euro, inclusa l'estensione al biologico) ed il tempo di registrazione è più breve (in genere 1-2 anni). La registrazione di queste sostanze avviene una volta e non richiede rinnovi. L'Europa è il luogo nel quale la legislazione in materia è la più garantista a livello mondiale per il consumatore, pertanto, le norme sono particolarmente restrittive ed i tempi piuttosto lunghi, se confrontati con quello che accade in altre parti del mondo, soprattutto per i prodotti biologici e le sostanze naturali. È in corso un processo di ripensamento di tale strategia, che potrebbe portare ad una maggiore disponibilità di agenti di biocontrollo e sostanze naturali, particolarmente utili per il mondo del biologico e per raggiungere alcuni degli obiettivi della strategia Farm to Fork (dimezzamento dell'uso e del rischio relativo ai prodotti chimici e incremento delle superfici a biologico al 25%), con una corsia preferenziale (*fast track*), sulla quale il 14 ottobre si è chiusa una consultazione pubblica, che potrebbe essere regolamentata entro il 2025.

Riferimenti bibliografici

- BECKERMAN, J., PALMER, C., TEDFORD, E., YPEMA, H. (2023): *Fifty years of fungicide development, deployment, and future use*. «Phytopathology», 113: pp. 694-706.
- ROMANAZZI, G., ORÇONNEAU, Y., MOUMNI, M., DAVILLERD, Y., MARCHAND, P.A. (2022): Basic substances, a sustainable tool to complement and eventually replace synthetic pesticides in the management of pre and postharvest diseases: reviewed instructions for users. «Molecules», 27, p. 3484.
- <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/active-substances>