

Giornata di studio su:

Sistemi innovativi di monitoraggio  
delle popolazioni di insetti:  
possibili applicazioni  
per una difesa efficace e mirata delle colture

Firenze, 25 settembre 2008



## Nuove tecniche di controllo di insetti fitofagi dannosi mediante l'uso di semiochimici

### IL PROLOGO: LA FORMULAZIONE DELL'IDEA

La comunicazione è uno degli elementi fondamentali della vita che, in forme e modalità diverse, caratterizza e condiziona le relazioni biologiche fra gli organismi viventi di ogni ordine e grado evolutivo, dai rapporti elementari intercorrenti fra i microrganismi fino a quelli più evoluti propri della vita sociale degli umani (Schneider, 1992). La comunicazione basata su segnali di natura chimica è ampiamente diffusa fra gli organismi viventi e, sebbene fosse stata ipotizzata da molto tempo, solo recentemente ne è stato compreso pienamente il ruolo e l'importanza. Un notevole impulso agli studi sulla comunicazione chimica è stato impresso dalle osservazioni compiute sugli insetti dai naturalisti operanti tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo (Fabre, 1879; Forel, 1910). Secondo questi studi pionieristici le femmine dei lepidotteri sembravano emettere un odore sessuale in grado di attirare i maschi anche da notevoli distanze. Le conferme che via via si accumulavano circa l'esistenza di questi segnali odorosi stimolarono la curiosità non solo dei biologi naturalisti, ma anche di chimici ed agronomi interessati ad identificarne la natura e a sfruttarne le potenzialità attrattive a fini fitoiatrici. E infatti, dopo numerosi anni di ricerca e di applicazione di catture massali mediante l'uso di trappole innescate con femmine vergini, realizzate nei vigneti della Germania nel corso degli anni '30, l'entomologo Bruno Götz (1940) arrivò a preconizzare l'uso di questi attrattivi sessuali per il controllo della tignola della vite. Considerando lo straordinario potere attrattivo espresso dalle piccole quantità di odore sessuale emesse da una singola femmina, egli riteneva possibile, una volta trovato

\* *Dipartimento Protezione delle Piante, Centro Sperimentale, IASMA (TN)*

il modo di identificarne la natura chimica e individuate le modalità per sintetizzarlo, l'applicazione di grandi quantità di attrattivo quale metodo di lotta che avrebbe rimpiazzato i tradizionali composti arsenicali all'epoca utilizzati (Arn, 1990). I suoi tentativi di identificare la natura dell'attrattivo sessuale emesso dalla tignola purtroppo non ebbero successo, e l'idea geniale di controllarne le infestazioni con un approccio così innovativo dovette lasciare il passo all'uso degli insetticidi di seconda generazione che, nel frattempo, iniziarono ad apparire sulla scena fitoiatrica, presidiandola efficacemente fino ai giorni nostri.

Dobbiamo attendere ancora un ventennio per ottenere la prima identificazione chimica di un attrattivo sessuale di insetti. Il successo si deve ad un ricercatore operante in quella straordinaria fucina scientifica rappresentata dal Max Planck Institute. Dopo essersi occupato dell'identificazione dei principali ormoni sessuali maschili e femminili, che gli valse il premio Nobel, Butenandt si cimenta nella sfida che fu del suo compatriota Götz e, nel 1959, scopre quello che chiamerà bombicolo, l'attrattivo sessuale di *Bombyx mori* L. (Lepidoptera, Bombycidae), il baco da seta (Butenandt et al., 1959). Nello stesso anno il suo collega Karlson formulerà per la prima volta il termine feromone per definire un attrattivo sessuale negli insetti (Karlson e Lüscher, 1959). Questo primo successo nell'identificazione di un feromone di insetto attivò una serie di virtuose collaborazioni fra chimici e biologi; i primi erano stimolati dalla disponibilità di nuovi strumenti e tecniche per l'isolamento e la determinazione della struttura dei composti organici, i secondi dal fascino di studiare il comportamento degli insetti utilizzando le molecole messe a loro disposizione dai chimici. Si intravvide così la possibilità di poter finalmente concretizzare l'idea che fu di Götz, vale a dire interferire sul normale comportamento degli insetti utilizzando le stesse sostanze che lo regolano in natura, controllando così gli insetti fitofagi senza causare danni all'ambiente (Silverstein, 1990). Sulle ali dell'entusiasmo e della nuova consapevolezza dei danni causati dai fitofarmaci (Carson, 1962) fioriscono le ricerche e le applicazioni empiriche di queste nuove molecole sia nell'ambito del monitoraggio che del controllo diretto. L'uso dei feromoni nel monitoraggio degli insetti fornisce informazioni strategiche per la gestione delle problematiche fitoiatriche; esso rappresenterà da questo momento in poi uno strumento strategico per l'implementazione del concetto di lotta integrata che si stava formulando proprio in quel periodo (FAO, 1965). Nel decennio successivo si identificano i feromoni di una ventina di insetti; tale numero salirà a circa 200 nel corso degli anni settanta e a più di 1000 alla fine degli anni '80. Nonostante questi risultati e le energie profuse in tale ambito, i progressi ottenuti furono

inferiori alle aspettative. Come ebbe a dire molto più tardi Shorey nella sua prefazione al convegno sul tema tenutosi in Italia nel 1975 «l'identificazione e la sintesi di un feromone non è che l'inizio» (Shorey e McKelvey, 1997). Molti altri aspetti devono essere conosciuti prima che questo prezioso strumento sia efficace nel monitoraggio e nel controllo dei fitofagi. Si avverte già allora la carenza di conoscenza relativamente a come l'insetto usi in natura questa informazione chimica e se, e come, sia possibile interferire sul suo comportamento manipolandolo a nostro vantaggio. È proprio nel confrontarci con quest'ultimo obiettivo che le carenze di conoscenza apparvero evidenti anche a coloro che empiricamente avevano tentato di mettere a punto dei sistemi di lotta basati sull'uso dei feromoni. Il maschio, in genere, trova la partner seguendo una scia odorosa emessa dalla femmina vergine nel periodo di richiamo; si era ipotizzato, quindi, di diffondere nell'atmosfera della coltura una certa quantità di feromone sintetico al fine di "confondere" i maschi nella loro ricerca della femmina. In questo modo si sarebbe evitato o ritardato l'accoppiamento, annullando o riducendo il potenziale riproduttivo della specie bersaglio. I meccanismi alla base del funzionamento non erano (e non lo sono tuttora) perfettamente compresi, ma si ipotizzava (Bartell, 1982) che potessero basarsi su tre diverse modalità d'azione:

1. adattamento dei recettori antennali e del sistema nervoso centrale per la presenza di elevate quantità di feromone;
2. camouflagage o, altrimenti detto, mascheramento della scia feromonica;
3. falsa-traccia o disorientamento, vale a dire competizione fra sorgenti naturali e artificiali.

La relativa importanza di questi tre modi d'azione e il loro ruolo nel determinare la confusione sessuale è stata discussa a lungo da diversi autori. Secondo Bartell (1982) il meccanismo prevalente dipenderebbe dalla tecnica di distribuzione del feromone, mentre per Campion (1986) a livello di campo potrebbe verificarsi una combinazione dei tre meccanismi; infine, secondo Weatherston (1990) i tre meccanismi agirebbero in maniera sequenziale in funzione delle diverse condizioni ambientali o modalità applicative. Più recentemente è stato dimostrato che il meccanismo prevalente è anche dipendente dalla specie (Miller et al., 2006).

A fianco di incoraggianti successi ottenuti dal metodo sono stati segnalati frequenti casi di inefficacia che hanno minato l'entusiasmo di sperimentatori e agricoltori. I limiti di conoscenza segnalati da Shorey (Shorey e McKelvey,

1997) sono ancora largamente irrisolti alla fine degli anni '80. A quelli relativi all'inadeguatezza della conoscenza del comportamento e dei sistemi di comunicazione chimica fra gli insetti, Silverstein (1990) aggiunge anche quelli relativi alle condizioni bio-ecologiche (elevata densità di popolazione, immigrazione dall'esterno) e ai sistemi e modalità di distribuzione del feromone nella coltura da proteggere (scarsa qualità delle formulazioni, errato timing d'applicazione).

Nel frattempo il progresso tecnologico ha comunque messo a disposizione nuovi strumenti di indagine e nuovi materiali che hanno permesso, se non di risolvere interamente le problematiche relative al controllo dei fitofagi con l'uso dei feromoni, almeno di ampliare il nostro livello di conoscenza ponendo le basi per una loro vasta applicazione.

#### IL PRESUPPOSTO: LA COMPrensIONE DEI SISTEMI DI COMUNICAZIONE CHIMICA FRA GLI INSETTI

Le basi per comprendere i meccanismi reconditi della comunicazione chimica fra gli insetti furono poste ancora in quegli straordinari anni '50 e di nuovo presso il Max Planck Institute. Due anni prima che Butenandt identificasse il primo feromone, un suo collega, Dietrich Schneider, mise a punto una tecnica che permise di iniziare a comprendere la fisiologia della percezione olfattiva. Su sollecitazione di Karlson, impegnato nell'identificazione del bom-bicolo, Schneider realizzò un apparecchio che avrebbe dovuto provare, attraverso un test elettrofisiologico, l'efficacia delle frazioni analitiche saggiate. Lo strumento messo a punto da Schneider prevedeva di isolare un'antenna, montarla fra due elettrodi, investirla con uno stimolo odoroso e misurare attraverso un oscilloscopio la variazione di potenziale elettrico. La risposta così misurata venne chiamata elettroantennogramma (EAG) (Schneider, 1957). Questa strumentazione, perfezionata in seguito dall'allora suo allievo Karl-Ernst Kaissling, aprì un nuovo campo di studio che venne chiamato ecologia chimica (chemical ecology). Fu infatti possibile, mediante l'approccio elettrofisiologico, comprendere che gli insetti non percepivano solo i feromoni emessi dai loro partner sessuali, ma anche una miriade di altri stimoli odorosi presenti nell'ecosistema da loro occupato. In effetti essi popolano un universo ricco di stimoli chimici, provenienti da individui della stessa specie e dall'ambiente in generale, che li orientano nei due principali processi della vita: riproduzione ed alimentazione (Witzgall et al., 2008). I vantaggi legati all'uso di segnali chimici per la comunicazione dipendono dal fatto che pos-

sono essere utilizzati al buio, che possono viaggiare in presenza di ostacoli senza subire alterazioni, che si prestano come marcatori, che possono essere veicolati a lunga distanza dal vento o dall'acqua senza ulteriore apporto energetico e che possono essere molto specifici (Howse et al., 1998). All'insieme delle sostanze chimiche coinvolte nella comunicazione venne dato il nome di semiochimici. Questo insieme di sostanze è stato a sua volta suddiviso in diverse categorie in funzione del rapporto intercorrente fra i soggetti coinvolti nella comunicazione. Furono pertanto individuati come feromoni i soli messaggeri chimici che vengono utilizzati da individui della stessa specie, mentre fra i messaggeri interspecifici (allelchimici) si distinsero i cairomoni, quando gli stimoli olfattivi determinano un beneficio per l'organismo destinatario del messaggio, dagli allomoni nel caso in cui le sostanze chimiche avvantaggiano l'individuo che le emette (Brown et al., 1970; Whittaker e Feeny, 1971). Queste nuove acquisizioni, oltre a colmare una grave carenza di conoscenza sui sistemi di comunicazione chimica, permisero di sviluppare o di ipotizzare nuove tecniche di monitoraggio e controllo.

I semiochimici emessi dalle piante sono in grado di produrre un'ampia gamma di risposte comportamentali negli insetti. Le sostanze volatili emesse dalle piante si aggiungono ai feromoni nel modellare il comportamento riproduttivo degli insetti. Alcuni insetti producono e rilasciano feromoni in risposta a specifici stimoli della pianta ospite e le sostanze chimiche della pianta ospite spesso inducono una risposta sinergica al feromone degli insetti. Esse, a differenza dei feromoni, agiscono su entrambi i sessi in quanto entrambi interessati a trovare la pianta ospite, la femmina perché deve deporre le uova in prossimità della futura fonte alimentare della prole, il maschio per identificare il sito dove è più probabile l'incontro con la femmina (Witzgall et al., 2008). Indagini elettrofisiologiche sulla percezione olfattiva periferica hanno permesso di evidenziare, oltre alle note cellule olfattive specifiche per la percezione di feromoni o cairomoni, anche l'esistenza di neuroni olfattivi in grado rispondere contemporaneamente alla sollecitazione di stimoli feromonal e cairomonali (De Cristofaro et al., 2004; Ansebo et al., 2005). È forse per questo motivo che l'aggiunta di sostanze cairomonali emesse dalla pianta ospite a componenti sintetici del feromone sessuale può indurre un effetto sinergico (Landolt e Phillips, 1997). Questa caratteristica è stata sfruttata per migliorare il potere attrattivo degli inneschi per il monitoraggio (Light et al., 1993). Sono inoltre in corso sperimentazioni per utilizzare questo effetto sinergico per migliorare il potere attrattivo dei diffusori utilizzati nel controllo diretto di quelle specie in cui il meccanismo d'azione della confusione sessuale è prevalentemente di tipo competitivo (disorientamento). Siccome

tali sostanze sono degli efficaci attrattivi anche per le femmine, sono stati sviluppati dei particolari inneschi in grado di catturare femmine (Schmidt et al., 2007) che hanno reso molto più affidabile l'informazione proveniente dall'attività di monitoraggio ai fini dell'identificazione del corretto momento per l'esecuzione dei trattamenti insetticidi (Schmidt et al., 2006). Sono state inoltre realizzate delle sperimentazioni preliminari nelle quali si è dimostrata la possibilità di interferire, mediante trattamenti con caïromoni, sulla corretta localizzazione dei siti di ovideposizione da parte delle femmine (Pasqualini et al., 2005a) e sul meccanismo di localizzazione dei frutti da parte di larve carpofaghe (Pasqualini et al., 2005b; Schmidt et al., 2008).

I semiochimici di origine vegetale, infine, possono avere anche un'azione inibitoria o repellente che interrompe la risposta dell'insetto al feromone, ed anche in tal caso possono giocare un ruolo le cellule olfattive stimolate da entrambi i tipi di composto (De Cristofaro et al., 2004; Ansebo et al., 2005), oppure attirare predatori e/o parassitoidi che attaccano i fitofagi dopo che questi hanno causato danni alla pianta (Reddy e Guerrero, 2004).

#### LA SINTESI SCIENTIFICA E TECNOLOGICA: LO SVILUPPO DELLE FORMULAZIONI

Lo sviluppo di sistemi di distribuzione dei semiochimici che soddisfacessero al contempo i requisiti chimici, biologici e agronomici necessari per garantire un efficace controllo del fitofago ha richiesto parecchi anni. Le sostanze feromonali sono spesso dei composti chimici molto instabili, soggetti facilmente ad ossidazione, isomerizzazione e fotodegradazione che determinano la perdita del loro potere attrattivo. Per molto tempo la ricerca si è dedicata alla messa a punto di formulazioni che assicurassero allo stesso tempo la stabilità chimica del feromone e la costanza di emissione, unitamente ad una persistenza adeguata a coprire l'intero periodo di attività sessuale del fitofago. Dopo le prime esperienze effettuate con sistemi artigianali (Ioriatti et al., 1987; Ioriatti e Vita, 1989) l'interessamento dell'industria ha consentito di mettere a punto rapidamente dei sistemi in grado di soddisfare efficacemente i requisiti richiesti. Il problema è stato affrontato con due diversi approcci:

1. sistemi in grado di diffondere quantità rilevanti di feromone da un limitato numero di erogatori per ettaro;
2. sistemi di diffusione del feromone che tendenzialmente avrebbero dovuto simulare le quantità emesse dalle femmine.



Nel primo caso si tratta sostanzialmente di matrici di diversa natura impregnate di attrattivo (Ecodian, Isagro; Ecotape, Certis; Checkmate, Concep; Cidetrak, Trece; ecc.), oppure di diffusori detti “a serbatoio” dai quali l’attrattivo, permeando attraverso le pareti, è emesso nell’atmosfera della coltura (Isonet, Shin-Etsu/CBC; RAK, Basf). Le tipologie attualmente più utilizzate a livello mondiale sono gli erogatori in polietilene a spaghetti Isonet e gli erogatori a doppia ampolla RAK, i quali sono risultati essere la soluzione che meglio soddisfa i requisiti richiesti in termini di stabilità chimica dell’attrattivo, costanza di emissione dall’erogatore e persistenza nel tempo (Rizzi et al., 2008). In tutti i casi gli erogatori sono applicati manualmente in ragione di 500-2000 unità per ettaro in funzione della tipologia. Il meccanismo sul quale si basa l’efficacia dei diffusori è ritenuto essere prevalentemente l’attrazione competitiva (Miller et al., 2006) e la concentrazione di feromone nell’atmosfera della coltura conseguibile con l’applicazione di 100 g di feromone/ha/stagione è stimata essere dell’ordine di 1 ng/mc (Koch et al., 1997). Lo svantaggio di queste formulazioni consiste nel fatto che il feromone emesso nel corso della giornata risulta per lo più inefficace ai fini del controllo degli accoppiamenti, i quali si verificano solo in specifiche ore del giorno. A questo si aggiungono i costi di applicazione che, qualora la coltura abbia una certa estensione, possono rappresentare un fattore limitante. Una possibile soluzione a queste problematiche è rappresentata dall’uso di diffusori temporizzati collocati nella coltura in numero di qualche unità per ettaro ed in grado di diffondere l’attrattivo solo nelle ore nelle quali effettivamente è necessario. Questi erogatori, chiamati “puffers”, sono collocati lungo il perimetro dell’appezzamento e rilasciano, nel caso del controllo della carpocapsa delle mele, *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae), 250 mg/ha/giorno riuscendo ad assicurare concentrazioni di feromone nell’aria fino a 60 ng/mc (Shorey e Gerber, 1996). Un’altra possibile soluzione per ridurre il tempo di applicazione è stata perseguita con la messa a punto di formulazioni microincapsulate distribuibili sulla vegetazione con i normali atomizzatori o con mezzi aerei. Attualmente questo approccio è purtroppo limitato dalla ridotta persistenza, dalla notevole perdita per dilavamento in caso di pioggia e dalla fotodegradazione, che impone di ripetere il trattamento più volte nel corso della stagione.

L’approccio che prevedeva la messa a punto di micro-erogatori tali da simulare la femmina in richiamo ha dato eccellenti risultati a metà degli anni ’70, quando fu proposto l’impiego di microfibre cave (hollow fiber) ciascuna caricata con piccole quantità di feromone e resa adesiva da un collante,

che venivano distribuite sulla vegetazione in grandi quantità. Il meccanismo d'azione in questo caso è chiaramente l'attrazione competitiva fra la sorgente naturale e quella equivalente costituita dal microerogatore. Le sperimentazioni, malgrado avessero dato risultati interessanti, furono abbandonate per le difficoltà tecniche incontrate nella distribuzione, per la scarsa persistenza e per l'imbrattamento della coltura (Witzgall et al., 2008). Gli stessi presupposti stimolarono la messa a punto di un'altra tecnica denominata *Attract and Kill* (Ioriatti e Angeli, 2002). In questo caso l'attrattivo era miscelato ad un insetticida abbattente in una pasta che veniva applicata manualmente sulla chioma in ragione di qualche migliaio di punti/ha di frutteto. L'insetto in parte subiva l'attrazione competitiva delle gocce e in parte, qualora fosse venuto a contatto con le gocce, sarebbe stato ucciso dall'azione dell'insetticida. Anche in tal caso la ridotta persistenza e i prolungati tempi di applicazione erano tali da determinare un forte limite alla sua applicazione generalizzata nelle colture commerciali.

Rimanendo nell'ambito dei diffusori "female-equivalent", come sono definiti dai colleghi anglosassoni, si stanno studiando dei sistemi che facilitino la distribuzione delle sorgenti attrattive. L'approccio è alquanto innovativo e per il momento ancora in fase di studio. Si sta infatti valutando la possibilità di distribuire le sorgenti attrattive avvalendosi degli insetti stessi, i quali, opportunamente "contaminati" d'attrattivo lo veicolerebbero nella coltura, divenendo essi stessi delle sorgenti di attrazione. A tal proposito si è proposto di imbrattare i maschi con l'attrattivo della femmina della stessa specie (auto-confusione) (Howse et al., 2007) o addirittura maschi e femmine di specie affini (*ménage a trois*) (Suckling et al., 2007).

Nel primo caso si fa uso di particelle inerti (tecnologia *EsoSex*) che hanno la caratteristica di aderire elettrostaticamente alla cuticola degli artropodi. Il fitofago è attirato all'interno di una stazione di contaminazione dove si sporca con questa polvere miscelata al feromone sessuale. Gli studi preliminari su questa nuova tecnologia sembrano indicare che il meccanismo d'azione coinvolto nel determinare l'efficacia sia riconducibile all'affaticamento sensoriale, all'inibizione del corteggiamento e alla dilazione dell'accoppiamento. La stessa tecnologia è stata utilizzata per verificare la possibilità di disseminare nell'ambiente attraverso gli insetti (*carriers*) insetticidi di sintesi o biologici (auto-disseminazione).

Nel secondo caso, il metileugenolo, un attrattivo efficace sui maschi di alcune specie di mosche della frutta (Diptera, Tephritidae), viene applicato sugli individui di una specie affine che andranno a costituire una sorgente mobile di attrattivo sintetico. Il concetto, che è stato per il momento solo

abbozzato in prove del tutto preliminari, potrebbe trovare utile applicazione laddove si potesse disporre di attrattivi potenti (feromoni) da applicare a specie affini non dannose o ad ibridi sterili.

Parallelamente al progresso compiuto nella predisposizione di sistemi di distribuzione affidabili si sono affrontate anche le problematiche legate alle corrette modalità di applicazione in campo che soddisfacessero i requisiti imposti dal contesto bioecologico in cui si opera. Le difficoltà connesse con la gestione di elevate densità di popolazione del fitofago, le difficoltà di controllare la potenziale immigrazione dall'esterno degli insetti, nonché la necessità di contrastare la diluizione della concentrazione del feromone nell'atmosfera della coltura operata dai movimenti dell'aria, hanno per molti anni stimolato l'attenzione e l'impegno degli sperimentatori di campo. La soluzione fu trovata quando si passò da una applicazione su superfici di limitata estensione all'applicazione su scala territoriale. Esempi in tal senso sono presenti negli stati orientali degli USA con il progetto CAMP per il controllo della carpocapsa, l'esperienza altoatesina per il controllo dello stesso carpofo e quella trentina per il controllo delle tignole della vite (Calkins et al., 2003; Ioriatti et al., 2004; Waldner, 2005). In tutti questi casi la superficie trattata è di diverse migliaia di ettari (dai circa 10.000 del Trentino ai 18.000 dell'Alto-Adige, ai 48.000 degli USA). Il trattamento di ampie superfici contigue ha consentito di migliorare la diffusione del feromone nell'atmosfera, mantenendo stabile la sua concentrazione e minimizzando i danni lungo i bordi dell'area trattata, normalmente esposti all'attacco causato dall'immigrazione di insetti dall'esterno. La gestione coordinata su area territoriale ha consentito un graduale ridimensionamento dell'uso di insetticidi (inizialmente applicati in combinazione con la lotta con semiochimici), pur mantenendo una densità di popolazione compatibile con il metodo della confusione. Se il monitoraggio degli insetti mediante le trappole a feromoni ha rappresentato una colonna portante della lotta integrata, così l'uso dei feromoni per il controllo diretto dei fitofagi costituisce spesso l'occasione e il presupposto per l'applicazione del concetto di gestione della difesa delle colture su scala territoriale (Rabb, 1977; Koul et al., 2008). Con questo approccio la superficie trattata con semiochimici per il controllo diretto dei fitofagi è rapidamente cresciuta e attualmente ha superato i 600.000 ettari a livello mondiale (tab. 1).

In questo contesto appare ancora più evidente quanto sia importante investire su modalità di distribuzione del feromone che riducano i tempi di applicazione, ma forse ancora più importante è poter disporre di tecnologie innovative per il monitoraggio automatico che ci diano un costante aggior-

FITOFAGO	COLTURA	AREA (HA)	PRINCIPALI PAESI*
<i>Pectinophora gossypiella</i>	cotone	55.000	USA, IL, MEX, E
<i>Cydia pomonella</i>	melo, pero, noce	155.000	USA, I, F, SA, RA., AUS
<i>Grapholitha molesta</i>	pesco, melo susino	58.000	USA, AUS, I, ZA
<i>Lobesia botrana</i>	vite	50.000	D, I, E, CH, F, A, P
<i>Eupoecilia ambiguella</i>	vite	56.000	D, I, CH, A
<i>A. orana</i> , <i>P. heparana</i> , <i>A. ljungiana</i> etc.	fruttiferi, tea	15.000	J, USA, I
<i>S. myophaformis</i> , <i>S. tipuliformis</i> , etc.	fruttiferi, ribes	10.000	USA, NZ, J
<i>Keiferia lycopersicella</i>	pomodoro	10.000	J, MEX
<i>Zeuzera pyrina</i>	pero, olivo	3.000	E, P, I
<i>Chilo suppressalis</i>	riso	2.000	E
<i>Lymantria dispar</i>	forestali	200.000	USA
Altri		27.000	J, USA, CDN, ZA
Totale superficie (ha)		641.000	

Tab. 1 Superficie mondiale trattata con semiochimici per il controllo dei fitofagi (dati 2006) (modificata da Veronelli; Congresso Italiano di Entomologia, 2007)

\*Argentina, RA; Austria, A; Canada, CDN; Francia, F; Giappone, J; Israele, IL; Italia, I; Messico, MEX; Nuova Zelanda, NZ; Spagna, E; Stati Uniti d'America, USA; Svizzera, CH; Sud Africa, ZA

namento della situazione in essere (Waldner, 2005; Witzgall et al., 2008). Questi sistemi di lotta preventiva infatti esigono una costante opera di sorveglianza che viene realizzata mediante l'uso di trappole sessuali distribuite nelle aree trattate che devono essere sistematicamente controllate al fine di allertare gli operatori non appena si verifichi un segnale di inefficacia del metodo.

#### RINGRAZIAMENTI

Un vivo ringraziamento a tutti i colleghi che da anni condividono con me l'interesse e l'attività di ricerca su questo argomento a me tanto caro. Un ringraziamento particolare al Prof. Antonio De Cristofaro (UNIMOL), al Dott. Andrea Lucchi (UNIP) e al Dott. Gianfranco Anfora (FEM-IASMA) per il loro prezioso contributo nella revisione critica di questo manoscritto.

#### RIASSUNTO

La scoperta che la comunicazione negli insetti è mediata principalmente da sostanze chimiche ha consentito di pensare ad una possibile utilizzazione delle stesse per il controllo delle infestazioni nelle colture agrarie e forestali. Ciò si è potuto concretizzare a seguito dell'identificazione e della sintesi dei feromoni, ma soprattutto dopo aver compreso i meccanismi che regolano la comunicazione negli insetti e aver messo a punto adeguate

formulazioni per la diffusione dei semiochimici nell'atmosfera delle colture. Grande impulso all'applicazione di questa tecnologia, che oggi interessa oltre 600.000 ettari a livello mondiale, è stato dato dall'implementazione del concetto di gestione territoriale della difesa delle colture. Un ulteriore sostegno alla sua diffusione potrà verificarsi con la messa a punto di sistemi agili per la sorveglianza capillare del territorio.

#### ABSTRACT

Since when we have known that communication among insects is mediated by chemicals, we began to speculate on the possible use of the same compounds in the integrated pest management. That was actually possible with the chemical identification and synthesis of the insect pheromones, the definition of their chemical communication systems and the development of adequate pheromone formulations. The great success of the semiochemical based mating disruption, that nowadays accounts for more than 600,000 ha worldwide, was achieved thanks to the area wide pest management approach. A wider implementation of semiochemical tools in the pest control could be possible if easy, reliable and automated devices for the area wide surveillance will be available.

#### BIBLIOGRAFIA

- ANSEBO L., IGNELL R., LÖFQVIST J., HANSSON B. (2005): *Responses to sex pheromone and plant odours by olfactory receptor neurons housed in sensilla auricillica of the codling moth, Cydia pomonella (Lepidoptera: Tortricidae)*, «J. Insect Physiol.», 51, pp. 1066-1074.
- ARN H. (1990): *Pheromones: prophecies, economics, and the ground swell*, in *Behaviour-modifying chemicals for insect management: applications of pheromones and other attractants*, a cura di R.L. Ridgway, R.M. Silvertin, M.N. Inscoc, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 717-722.
- BARTELL R.J. (1982): *Mechanisms of communication disruption by pheromone in the control of Lepidoptera: a review*, «Physiol. Entomol.», 7, pp. 353-364.
- BROWN W.L., EINNER T., WHITTAKER R.H. (1970): *Allomones and kairomones: transpecific chemical messengers*, «BioScience», 20, pp. 21-22.
- BUTENANDT A., BECKMANN R., STAMM D., HECKER E. (1959): *Über den Sexuallockstoff des Seitenspinners Bombyx mori. Reindarstellung und Konstitution*, «Z. Naturforsch.», 14b, pp. 283-284.
- CALKINS C.O., FAUST R.J. (2003): *Overview of areawide programs and the program for suppression of codling moth in western USA directed by the United States department of Agriculture – Agricultural research service*, «Pest Manag. Sci.», 59, pp. 601-604.
- CAMPION D.G. (1986): *Survey of pheromone uses in pest control*, in *Techniques in pheromone research*, a cura di H.E. Hummel e T.A. Miller, Springer Verlag, New York, pp. 405-449.
- CARSON R. (1962): *Silent spring*, Houghton Mifflin, Boston.
- DE CRISTOFARO A., IORIATTI C., PASQUALINI E., ANFORA G., GERMINARA G.S., VILLA M., ROTUNDO G. (2004): *Electrophysiological responses of Cydia pomonella to codlemone and pear ester ethyl (E,Z)-2,4-decadienoate: peripheral interactions in their perception and*

- evidences for cells responding to both compounds, «Bulletin of Insectology», 57, 2, pp. 137-144.
- FABRE J.H. (1879): *Souvenirs Entomologiques*, Delagrave, Paris.
- FAO (1965): *Proceeding FAO symposium on integrated pest control*, Roma.
- FOREL A. (1910): *Das Sinnesleben der Insekten*, Reinhard, München.
- GÖTZ B. (1940): *Sexualduftstoffe als Lockmittel in der Schädlingsbekämpfung*, «Umschau», 44, pp. 794-796
- HOWSE P., STEVENS I., OWEN J. (1998): *Insect pheromones and their use in pest management*, Chapman and Hall, London.
- HOWSE P., ARMSWORTH C. BAXTER I. (2007): *Autodissemination of Semiochemicals and Pesticides: a New Concept Compatible with the Sterile Insect Technique*, in *Area-Wide Control of Insect Pests From Research to Field Implementation*, a cura di M. J. B. Vreysen, A. S. Robinson and J. Hendrichs, Springer, Netherlands, pp. 275-281.
- IORIATTI C., CHARMILLOT P.J., BLOESCH B. (1987): *Etude des principaux facteurs influençant l'émission d'attractifs sexuels synthétiques a partir de diffuseurs en caoutchouc et en plastique*, «Entomologia Experimentalis et Applicata», 44, pp. 123-130.
- IORIATTI C., VITA G. (1989): *Resultats preliminaires d'un essai de lutte par confusion sexuelle contre le vers de la grappe (L. botrana Schiff) dans un vignoble du Trentino*, «IOBC/WPRS Bulletin» 23, 7, pp. 80-84.
- IORIATTI C., ANGELI G. (2002): *Evaluation of an Attract an Kill formulation to control Cydia pomonella L. (Lepidoptera: Tortricidae)*, «IOBC/WPRS Bulletin», 25, 9, pp. 129-136.
- 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.
- KARLSON P., LÜSCHER M. (1959): *Pheromone, ein Nomenklatur-vorschlag für ein Wirkstoffklasse*, «Naturwissenschaften», 46, 63-64.
- KOCH U.T., LÜDER W., CLEMENZ S., CHICON L.I. (1997): *Pheromone measurements by field EAG in apple orchards*, «IOBC/WPRS Bulletin», 20, 1, pp. 181-190.
- KOUL O., CYPERUS G.W., ELLIOT N. (2008): *Areawide Pest Management: theory and implementation*, CABI, p. 590
- LANDOLT P.J., PHILLIPS T.W. (1997): *Host-plant influences on sex pheromone behaviour of phytophagous insect*, «Annu. Rev. Entomol.», 42, pp. 371-391.
- LIGHT D.M., FLATH R. A., BUTTERY R.G., ZALOM F.G., RICE R.E., DICKENS J.C., JANG E.B. (1993): *Host-plant green-leaf volatiles synergize the synthetic sex pheromones of the corn earworm and codling moth (Lepidoptera)*, «Chemoecology», 4, pp. 145-152.
- MILLER J.R., GUT L.J., DE LAME F.M., STELINSKY L.L. (2006): *Differentiation of competitive vs. non-competitive mechanisms mediating disruption of moth sexual communication by point sources of pheromone (part 2): case studies*, «J. Chem. Ecol.», 32, pp. 2115-2143.
- PASQUALINI E., SCHMIDT S., ESPÍÑA I., CIVOLANI S., DE CRISTOFARO A., MOLINARI F., VILLA M., LADURNER E., SAUPHANOR B., IORIATTI C. (2005a): *Effects of the kairomone ethyl (2E-4Z)-2,4-decadienoate (DA 2313) on the oviposition behaviour of Cydia pomonella: preliminary investigations*, «Bulletin of Insectology», 58, 2, pp. 119-124.
- PASQUALINI E., VILLA M., CIVOLANI S., ESPINHA I., IORIATTI C., SCHMIDT S., MOLINARI F., DE CRISTOFARO A., SAUPHANOR B., LADURNER E. (2005b): *The pear ester ethyl (E,Z)-2,4-decadienoate as a potential tool for the control of Cydia pomonella larvae: preliminary investigation*, «Bulletin of Insectology», 58, 1, pp. 65-69.
- RABB R.L. (1978): *A sharp focus on insect populations and pest management from a wide-area view*, «ESA Bulletin», 24, 1, pp. 55-61.

- REDDY G.V.P., GUERRERO A. (2004): *Interactions of insect pheromones and plant semi-chemicals*, «TRENDS in Plant Science», 9, 5, pp. 253-261.
- RIZZI C., ANFORA G., ANGELI G., IORIATTI C. (2008): *Per la confusione sessuale decisiva la durata dei dispenser*, «L'Informatore Agrario», 18, pp. 56-61.
- SCHMIDT S., ANFORA G., DE CRISTOFARO A., MATTEDI L., MOLINARI F., PASQUALINI E., IORIATTI C. (2006): *(2E, 4Z)-2,4-decadienoato di etile (derivato del pero): un nuovo strumento per il monitoraggio delle femmine di Cydia pomonella L. (Lepidoptera Tortricidae)*, «Informatore Fitopatologico», 5, pp. 17-24.
- SCHMIDT S., ANFORA G., GERMINARA G.S., IORIATTI C., ROTUNDO G., DE CRISTOFARO A. (2007): *Biological activity of ethyl (E,Z)-2,4-decadienoate on different tortricid species: electrophysiological responses and field tests*, «Environ. Entomol.», 36, 5, pp. 1025-1031.
- SCHMIDT S., TOMASI C., PASQUALINI E., IORIATTI C. (2008): *Activity of a kairomonal spray adjuvant formulation, DA-MEC, on the biological efficacy of Cydia pomonella Granulovirus in laboratory and field efficacy experiments*, «J. Pest Sci.», 81, 1, pp. 29-34.
- SCHNEIDER D. (1957): *Elektrophysiologische Untersuchungen von Chemo-und Mechano-rezeptoren der Antenne des Seidenspinners Bombyx mori*, «Z. Vergl. Physiol.», 40, pp. 8-41.
- SCHNEIDER D. (1992): *100 Years of pheromone research*, «Naturwissenschaften», 79, pp. 241-250.
- SILVERSTEIN R.M. (1990): *Practical use of pheromone and other behaviour-modifying compound: overview*, in *Behaviour-modifying chemicals for insect management: applications of pheromones and other attractants*, a cura di R.L. Ridgway, R.M. Silvertein, M.N. Inscoc, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 1-8.
- SHOREY H.H., GERBER R.G. (1996): *Use of puffers for disruption of sex pheromone communication of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in walnut orchards*, «Environ. Entomol.», 25, pp. 1398-1400.
- SHOREY H.H., MCKELVEY J.J. (1997): *Chemical Control of insect behaviour*, John Wiley & Sons, New York.
- SUCKLING D.M., JANG E.B., CARVALHO L.A., NAGATA J.T., SCHNEIDER E.L., EL-SAYED A.M. (2007): *Can ménage-a-trois be used for controlling insects?*, «J. Chem. Ecol.», 33, pp. 1494-1504.
- WALDNER W. (2005): *Constant monitoring enhances the success of pheromones in IFP*, «IOBC/WPRS Bulletin», 28, 7, pp. 277-281.
- WEATHERSTON I. (1990): *Principles of design of controlled-release formulations*, in *Behaviour-modifying chemicals for insect management: applications of pheromones and other attractants*, a cura di R.L. Ridgway, R.M. Silvertein, M.N. Inscoc, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 183-192.
- WHITTAKER R.H., FEENY P. (1971): *Allelochemicals: chemical interactions between species*, «Science», 171, p. 757.
- WITZGALL P., STELINSKI L., GUT L., THOMSON D. (2008): *Codling moth management and chemical ecology*, «Annu. Rev. Entomol.», 53, pp 503-522.





ROBERTO OBERTI\*

## Tecnologie innovative per il monitoraggio automatico delle popolazioni di insetti fitofagi

Signor Presidente, Signori Georgofili, Signore e Signori,

è un onore e motivo di grande emozione potervi presentare, in una sede così carica di prestigio, di scienza e di storia, alcuni risultati delle ricerche che con i miei colleghi conduciamo al Dipartimento di Ingegneria Agraria, sotto la guida di Maestri di questa disciplina.

### INTRODUZIONE

Lo sviluppo di metodi e tecnologie capaci di garantire una più accurata distribuzione dei prodotti fitoprotettivi costituisce da più di due decenni un fondamentale argomento di ricerca e innovazione nel settore dell'ingegneria agraria.

Obbiettivo generale di tali ricerche è di contribuire ad aumentare significativamente l'efficacia dei trattamenti, soprattutto mediante applicazioni meglio mirate sul bersaglio; ottenendo con ciò evidenti benefici sia ambientali, grazie alla riduzione della frazione di fitofarmaci inutilmente e dannosamente dispersa nell'ambiente, sia di costo, grazie alla potenziale diminuzione del numero di trattamenti necessari alla protezione delle colture.

I risultati di tali sforzi innovativi diventano evidenti quando si considera la straordinaria evoluzione che ha interessato le macchine preposte alla distribuzione dei fitofarmaci in campo. Nel corso di questi anni, infatti, i costruttori hanno dotato irroratrici e atomizzatori con dispositivi in grado di garantire l'omogeneità di distribuzione della dose desiderata di miscela fitoterapica; con ugelli e dispositivi idraulici e pneumatici che migliorano il raggiungimento della coltura e la pene-

\* *Dipartimento di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano*

trazione della coltre fogliare, minimizzando la deriva del getto nebulizzato; con sensori e sistemi di controllo automatici che, senza rallentare lo svolgimento del lavoro, permettono un'immediata e continua regolazione dei parametri operativi o di mantenere la perfetta sovrapposizione delle passate in campo; fino a giungere ai più recenti sistemi in grado di modulare automaticamente il fitofarmaco impiegato e la dose distribuita secondo i dati contenuti in mappe prescrittive, preventivamente elaborate in funzione dei fabbisogni specifici delle colture nelle diverse zone degli appezzamenti. Seguendo, cioè, i principi cardine dell'agricoltura di precisione: distribuire *dove*, *quando* e, nei casi possibili, *quanto* necessario.

Indubbiamente, il maggiore impulso a questa evoluzione è venuto dagli enormi sviluppi che elettronica e informatica hanno avuto in questo stesso arco di tempo, permettendo applicazioni sempre più sofisticate e affidabili, a fronte di costi via via più sostenibili per il settore meccanico-agrario.

Il grado di sviluppo raggiunto oggi, permette a queste stesse tecnologie elettroniche e informatiche di potere contribuire in modo decisivo allo sviluppo e ottimizzazione di metodi di difesa non convenzionali, quali quelli basati sui *semiochimici*, ampiamente trattati nella precedente comunicazione. Si tratta, come visto, di tecniche complementari alla distribuzione di fitofarmaci, specie nella lotta contro i fitofagi, che impiegando prodotti di sintesi per interferire con il naturale comportamento degli insetti, si prospettano come promettenti sistemi di difesa, capaci di ridurre fortemente le dosi di principi attivi usualmente impiegate nei trattamenti insetticidi su colture arboree od orticole.

Sebbene l'impiego di semiochimici rappresenti una notevolissima opportunità di innovazione nelle strategie di difesa dai fitofagi – e che, in casi specifici, abbia già trovato applicazioni pratiche –, vi è un generale accordo sul fatto che siano tuttora necessarie maggiori conoscenze sui dettagli dell'interazione semiochimico-insetto, specie riguardo ai fattori che in condizioni reali –ossia di campo aperto– interferiscono con questi meccanismi. Esiste, cioè, la necessità di disporre di strumenti e metodi di analisi che consentano un più accurato e costante monitoraggio delle risposte dell'insetto bersaglio agli stimoli semiochimici, al fine di migliorarne formulati, protocolli di uso e tecnologie di distribuzione, rimuovendo i fattori che nelle applicazioni pratiche ne limitano l'efficacia fitoprotettiva.

#### MONITORAGGIO COMPORTAMENTALE E MONITORAGGIO DELLE POPOLAZIONI DI INSETTI

Fino dagli albori degli studi entomologici, e in particolare delle loro applicazioni agrarie, l'osservazione e l'analisi delle risposte degli insetti agli stimoli

ambientali, chimici e fisici, ha costituito la base di conoscenza fondamentale per la messa a punto di pratiche di difesa delle colture dai fitofagi.

Relativamente a questo ambito scientifico, il termine monitoraggio si può sostanzialmente riferire all'acquisizione di due distinte tipologie di dati riferite, da un lato, ai comportamenti individuali degli insetti studiati e, dall'altro, alla dinamica temporale delle loro popolazioni.

Le informazioni raccolte nei due ambiti sono, ovviamente, complementari e concorrono insieme a fornire gli elementi necessari per lo sviluppo e l'ottimizzazione di mezzi di difesa efficaci. Tuttavia, il *monitoraggio comportamentale* risulta più strettamente connesso alle fasi di messa a punto di tali mezzi, mirando a identificare: le modalità di contaminazione con un formulato insetticida o la probabilità di contagio e disseminazione fra individui; la capacità di attrazione di un semiochimico e la definizione delle dosi ottimali o delle modalità di distribuzione; l'intensità con cui un formulato interferisce con comportamenti dannosi per le colture ecc.

Al *monitoraggio delle popolazioni* è, invece, affidato un compito di verifica dell'efficacia della strategia di difesa adottata che permette di identificarne punti deboli e di intraprendere opportune azioni correttive. Tale tipo di osservazioni trova, inoltre, diffusissime applicazioni gestionali nelle aziende agricole, costituendo un metodo ormai routinario per riconoscere precocemente l'insorgere di infestazioni di fitofagi e per programmare in modo tempestivo i trattamenti fitoprotettivi.

Tradizionalmente, le attività di monitoraggio vengono condotte con la tecnica più ovvia e semplice, ossia mediante osservazioni visuali. Si tratta di un'attività evidentemente onerosa e faticosa, che richiede personale adeguatamente preparato e che presenta forti limiti di durata dei rilievi e di garanzia nella ripetibilità dei dati acquisiti.

In genere, i rilievi comportamentali vengono condotti in laboratorio, all'interno di un'arena sperimentale di dimensioni limitate nella quale si simula al meglio l'ambiente di campo corrispondente alle condizioni operative che interessano – ad esempio, in presenza di una determinata sorgente di semiochimici –. Durante le osservazioni, l'operatore registra i comportamenti dell'insetto, codificandoli opportunamente, e dall'analisi dei dati ottenuti identifica e quantifica eventuali risposte che appaiano significative.

Risultano del tutto evidenti le enormi difficoltà a svolgere questo tipo di osservazioni in parcelle sperimentali poste in campo aperto e, ancor più, quando risulti necessario considerare le ore crepuscolari, o addirittura notturne, che numerose specie di fitofagi prediligono per la loro attività.

Il monitoraggio della dinamica delle popolazioni si basa invece sull'ispe-

zione, più o meno frequente, di dispositivi adesivi di cattura o conformati in modo da intrappolare l'insetto una volta che sia entrato, spesso associati a sorgenti attrattive di tipo semiochimico o alimentare o, più semplicemente, cromatico. All'operatore, in questo caso, è richiesto di contare gli esemplari catturati dalla trappola, stimando così l'evoluzione temporale della popolazione fitofaga nel sito di monitoraggio. Anche qui risultano evidenti i limiti operativi che insorgono quando si perseguano obiettivi non meramente indicativi: la risoluzione temporale dei dati rilevati, ossia la frequenza delle osservazioni, e la loro risoluzione spaziale, ossia il numero di dispositivi di cattura per unità di superficie monitorata, definiscono in modo fattoriale la quantità di osservazioni richieste agli operatori.

Queste importanti limitazioni applicative hanno spinto la ricerca di soluzioni tecnologiche in grado di agevolare le attività di monitoraggio sia in ambito comportamentale, sia di dinamica delle popolazioni.

#### TECNOLOGIE PER IL MONITORAGGIO COMPORTAMENTALE DEGLI INSETTI

L'applicazione di sensori e di sistemi di acquisizione di dati in esperimenti di monitoraggio comportamentale degli insetti risale al termine degli anni '70 del secolo scorso e hanno avuto come obiettivo generale quello di registrare la traiettoria dei movimenti all'interno di un'arena sperimentale di laboratorio. Nel caso di insetti atteri –ossia *camminatori*– sono state proposte soluzioni diversificate, tra cui: la misura di variazioni delle proprietà elettriche della base dell'arena sperimentale dovute, appunto, “all'impronta” dell'insetto studiato, quali a esempio la capacità (Chabora e Shukis, 1979) o la resistenza (Wheater, 1988), oppure il rilievo di vibrazioni trasmesse alle pareti dell'arena stessa (Leppla et al., 1979; Racette et al., 1990).

Ovviamente più complesso è il problema di rilevare le traiettorie di volo e per la sua soluzione sono stati sviluppati sistemi assai sofisticati e brillanti dal punto di vista fisico, come la misura della variazione nell'intensità di onde ultrasoniche stazionarie (Luff et al., 1979; Johnson et al., 1986) o l'interruzione di fasci luminosi proiettati all'interno nel volume studiato (Eaton, 1980; Kaneko et al., 1995).

È, tuttavia, l'introduzione di sistemi di videoregistrazione a imprimere un impulso decisivo alle tecniche di monitoraggio comportamentale. Dapprima utilizzate a supporto di osservazioni visuali per evidenziare particolari dettagli o per ripetere l'analisi delle scene registrate, dalla metà degli '80 le immagini cominciano a essere digitalizzate – ossia, convertite in formato numerico da

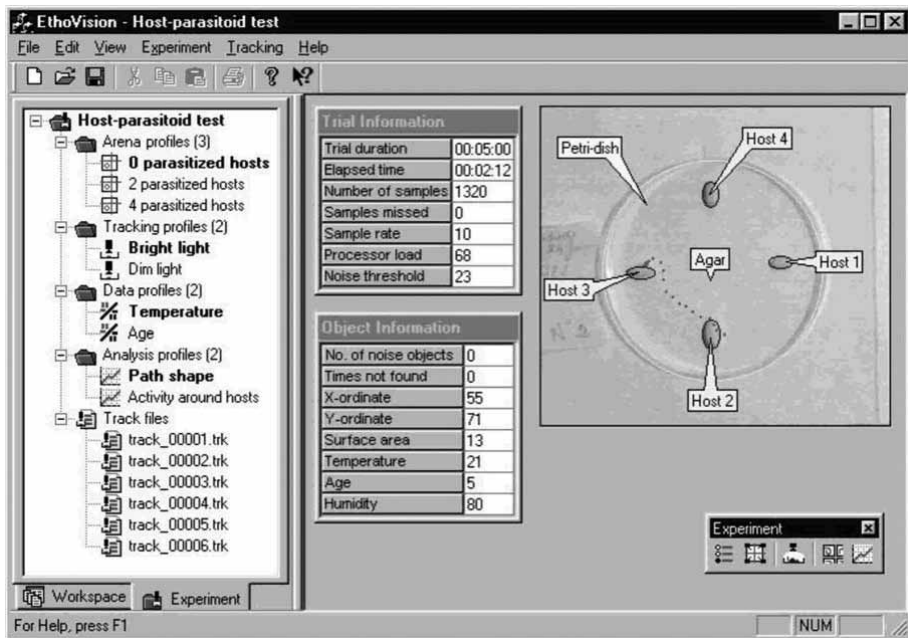


Fig. 1 Oggi il mercato offre diversi modelli di sistemi di imaging che permettono l'acquisizione e l'analisi automatica delle traiettorie degli insetti in studi comportamentali condotti in laboratorio

circuiti elettronici specializzati – così da potere essere analizzate da computer e fornire automaticamente dati relativi alla traiettorie dell'insetto. Ai lavori pionieristici condotti nel Regno Unito e Stati Uniti (Godden e Graham, 1983; David et al., 1983; Hoy et al., 1983) segue una rapida diffusione di tali sistemi nei laboratori entomologici e, da qualche anno, se ne dispongono diversi modelli commerciali (fig. 1).

La possibilità di ampliare il volume monitorato, sempre in condizioni di laboratorio, è stato affrontato da Fry e al. (2000) che hanno introdotto un sistema robotizzato per seguire le traiettorie tridimensionali di volo, agendo direttamente sui movimenti della telecamera e sulla focale dell'ottica. Questo tipo di approccio, ancora oggetto di ricerche finalizzate alla sua ottimizzazione, fornendo immagini ad alta risoluzione durante l'intera durata del volo, consente di monitorare specifici atteggiamenti comportamentali (sessuali, sociali, di alimentazione ecc.) identificabili dalla posizione assunta dalle diverse parti del corpo dell'insetto.

In termini generali, la caratteristica più notevole di questi sistemi di ac-

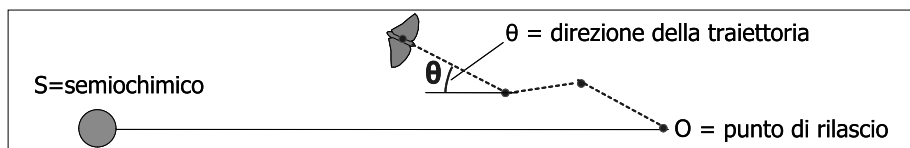


Fig. 2 La risposta di un insetto a uno stimolo proveniente da una sorgente semiochimica può essere studiata caratterizzando i suoi movimenti mediante la successione degli angoli  $\theta$  di direzione della traiettoria

quisizione e analisi di immagini, spesso indicati come sistemi di *imaging*, è la possibilità di ottenere indici numerici descrittivi delle traiettorie dell'insetto (quali direzione, velocità, massima prossimità al bersaglio ecc.) mantenute nel corso di misure che possono avere una durata virtualmente illimitata. Tali indici, infatti, permettono non solo di caratterizzare qualitativamente un determinato comportamento, ma anche di quantificare l'intensità con cui esso si manifesta e, quindi, di confrontare le risposte ottenute nelle diverse condizioni sperimentate.

A differenza dei rilievi visuali che possono essere significativamente influenzati da fattori soggettivi, quali sensibilità e competenza dell'osservatore, stanchezza ecc., si viene, così, a disporre di un *sistema di misura* capace di acquisire dati ripetibili e confrontabili anche a distanza di tempo.

La risposta a una sorgente semiochimica attrattiva può essere caratterizzata quantitativamente analizzando, a esempio, l'orientamento della traiettoria mantenuta da diversi individui in una serie di ripetizioni sperimentali. Un parametro utile a questo scopo, e facilmente ottenibile mediante un'analisi numerica delle traiettorie, è la distribuzione statistica della direzione di volo, definita come l'angolo sotteso da ciascun segmento che compone la traiettoria e la congiungente tra il punto di rilascio O e la posizione del semiochimico S (fig. 2).

In base a queste definizioni, una risposta indifferente all'attrattivo, corrispondente a un volo non orientato, non mostrerà alcuna direzione preferenziale nella distribuzione statistica di tale parametro (fig. 3A). Al contrario, nel caso di una risposta positiva al semiochimico, la distribuzione statistica delle direzioni della traiettoria mostrerà un massimo attorno alla congiungente O-S, ossia attorno all'angolo  $\theta=0$  (fig. 3C). Tali caratteristiche delle curve di distribuzione possono essere espresse univocamente da indici numerici che, dunque, rappresentano una vera e propria misura del comportamento rilevato.

Nonostante la vasta diffusione che i sistemi di *imaging* hanno avuto in laboratorio, le loro applicazioni in campo aperto sono state davvero episodiche.

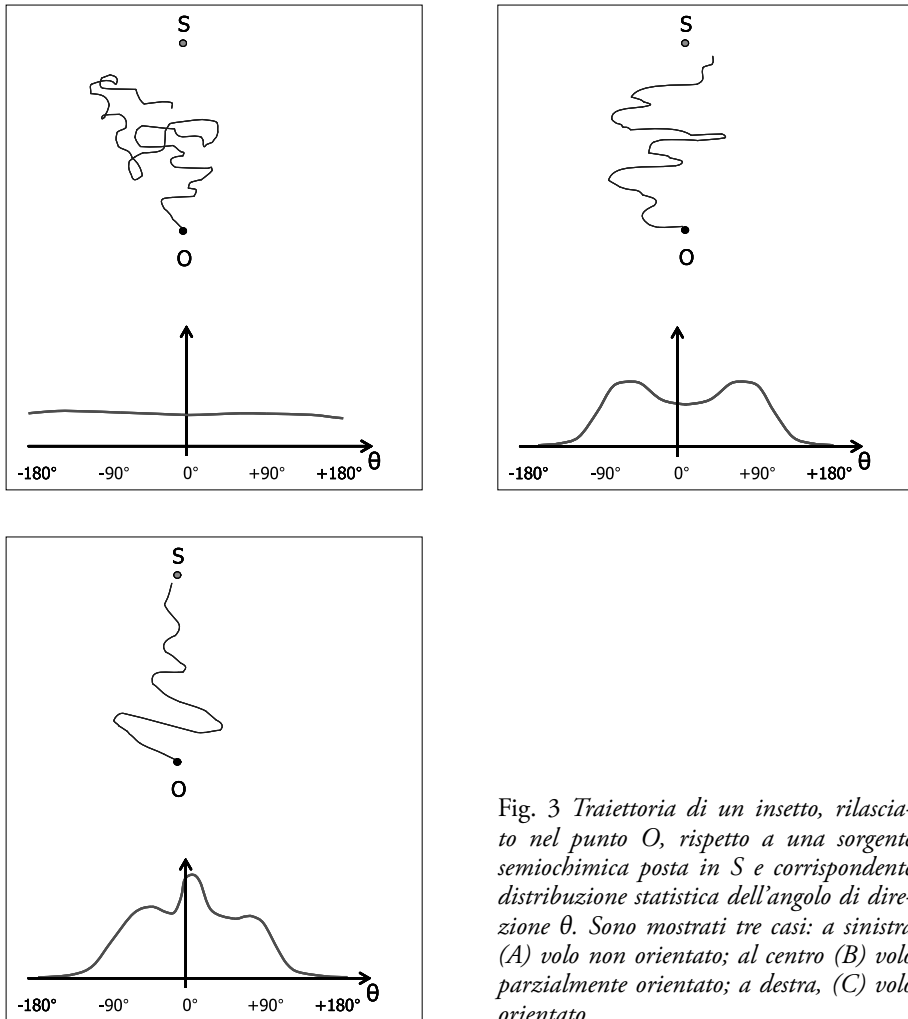


Fig. 3 *Traiettoria di un insetto, rilasciato nel punto O, rispetto a una sorgente semiochimica posta in S e corrispondente distribuzione statistica dell'angolo di direzione  $\theta$ . Sono mostrati tre casi: a sinistra (A) volo non orientato; al centro (B) volo parzialmente orientato; a destra, (C) volo orientato.*

Ciò è essenzialmente dovuto a una serie di limiti intrinseci a questa tecnica, fra i quali: la limitata risoluzione spaziale delle immagini che pregiudica la possibilità di riconoscere il comportamento degli insetti quando si desidera disporre di un ampio campo di visione; la difficoltà di identificare l'insetto su uno sfondo naturale; la necessità di illuminare la scena sperimentale nel caso di monitoraggio di insetti ad attività crepuscolare o notturna.

Risultano, perciò, di particolare valore scientifico le applicazioni pioneristiche di Voss e Ziel (1995) e di Vickers e Becker (1997). I primi autori hanno sviluppato un complesso sistema di identificazione automatica applicato allo



Fig. 4 *L'uso di transponder RFID miniaturizzati permette di seguire contemporaneamente le traiettorie di più individui in campo*

studio del volo di vespe e api in prossimità del nido che, comunque, richiedeva un intervento manuale dell'operatore per classificare i frequenti casi di scene non univocamente interpretate dal sistema. Vickers e Becker hanno invece condotto rilievi in pieno campo su *Heliotis virescens* –non a caso un fitofago di dimensioni relativamente grandi- montando una telecamera su una pedana soprelevata e illuminando artificialmente un'area di 3 m x 3 m. Lo studio mirava ad analizzare il comportamento dell'insetto durante l'avvicinamento a sorgenti feromoniche caricate con differenti dosaggi e le traiettorie sono state ricostruite riproducendo su uno schermo ciascun fotogramma videoregistrato e riportando manualmente (!) le posizioni dell'insetto su fogli trasparenti sovrapposti all'immagine proiettata.

A causa delle limitazioni incontrate dai metodi di *imaging* nell'identificare gli insetti bersaglio in condizioni di campo, si è fatto ricorso anche a tecniche di marcatura. A questi fini sono stati impiegati coloranti fluorescenti o piccoli dispositivi riflettenti (Zanen e Cardé, 1999) applicati al corpo degli individui rilasciati durante i rilievi.

Recentemente, sono state introdotte a tali fini anche “etichette elettroniche” che, applicate al corpo degli insetti, possono essere rilevate da apposite antenne ricetrasmittenti. Si tratta, in generale, di circuiti passivi – che, cioè,



non richiedono alimentazione elettrica – i quali, ricevendo un impulso elettromagnetico dall'antenna scanner, si caricano per induzione e riemettono, a loro volta, un impulso corrispondente a un codice identificativo univoco rilevato dallo scanner stesso, quando l'insetto si trova nel raggio di azione. L'uso di questi *transponder* (transmitting-responder) RFID (radio frequency identification) in studi di monitoraggio comportamentale di insetti è reso possibile dall'estremo livello di miniaturizzazione raggiunto in tale settore e, oggi, sono disponibili *transponder* con masse dell'ordine di decine di milligrammi, compatibili con le capacità di volo di insetti di medie dimensioni (fig. 4). Sebbene essi consentano, in linea di principio, di seguire contemporaneamente le traiettorie di un numero anche elevato di individui, si deve considerare che il raggio di azione di questi sistemi è limitato a poche decine di centimetri e che, quindi, la parcella sperimentale deve essere coperta da una fitta rete di antenne scanner. Nel caso di utilizzo di tecniche radar, che richiedono strumentazioni con ordini di costo enormemente superiori, il raggio di azione di tali *transponder* può fino salire a centinaia di metri (Riley e Smith, 2002).

#### TECNOLOGIE PER IL MONITORAGGIO DELLE POPOLAZIONI DI INSETTI

Le prime attività sistematiche di monitoraggio dell'evoluzione delle popolazioni di insetti furono condotte in circoscritti ambiti territoriali fin dalla seconda metà del XIX secolo, utilizzando dispositivi di cattura – progenitori delle attuali trappole – che permettevano di conteggiare un campione di individui, assunto come rappresentativo della popolazione di insetti residente nei dintorni del sito di cattura.

I primi risultati ottenuti evidenziarono presto come per comprendere le dinamiche registrate localmente nelle diverse stagioni, fosse necessario allargare la scala spaziale dei rilievi. Questo concetto di *rete di monitoraggio* si sviluppò soprattutto nel Regno Unito, dove a Rothamsted venne installato nel 1933 il primo nucleo costitutivo di una rete nazionale di trappole luminose (fig. 5A) per la cattura e il monitoraggio di diverse popolazioni entomologiche (Harrington e Woiwod, 2007). Su questo modello, durante gli anni '60 del secolo scorso, venne istituita una rete di trappole ad aspirazione per il monitoraggio delle popolazioni di insetti che si spostano nei primissimi strati dell'atmosfera, a quote di 10-20 m dal terreno (fig. 5B).

I dati raccolti con questo tipo di torri a suzione si sono dimostrati di notevole utilità fitoprotettiva, soprattutto nelle strategie di lotta contro gli afidi,



Fig. 5 *Trappola luminosa (sinistra) e torre di aspirazione (destra) installate presso il centro di ricerche di Rothamsted (Harpenden, GB). Entrambi i dispositivi sono parte di una rete europea di monitoraggio delle popolazioni di insetti*

tanto che la UE negli anni scorsi ha supportato con il progetto EXAMINE (EXploitation of Aphid Monitoring systems IN Europe) la costituzione di una rete europea, oggi diffusasi in sedici Paesi. Il centro di coordinamento di tali stazioni dirama settimanalmente un bollettino entomologico sulla cui base numerosi osservatori fitopatologici europei determinano i calendari dei trattamenti aficidi.

È importante rilevare che nei due esempi citati la valutazione delle entità delle diverse popolazioni catturate è basata sull'osservazione visuale dei campioni raccolti, condotta secondo protocolli definiti. Il contributo dato dalle tecnologie innovative, qui, consiste soprattutto nel ruolo fondamentale che sistemi informatici e di comunicazione giocano nella trasmissione, gestione e analisi della enorme mole di dati che tali reti di monitoraggio producono. Senza addentrarsi nei dettagli tecnici legati a tali applicazioni delle cosiddette ICT (*information and communication technologies*), si vuole comunque sottolineare come esse costituiscano l'ossatura fondamentale – la cui funzione, spesso, è data per scontata – di ogni sistema distribuito di misura e di elaborazione di dati.

Non mancano, tuttavia, esempi di applicazioni tecnologiche più propriamente dirette al rilevamento e alla quantificazione degli insetti che popolano una determinata area. Il caso più notevole e classico è certamente quello dei sistemi radar che, da ormai un cinquantennio, costituiscono il solo strumento in grado di monitorare la presenza di sciame di insetti negli strati bassi

dell'atmosfera, a quote di centinaia di metri dal terreno. I successi ottenuti con questa tecnica hanno dato vita a una vera e propria branca specialistica di studio: l'*entomologia radar*.

Alla base delle tecniche radar (*radio detection and ranging*) è l'uso di antenne ricetrasmittenti che emettono un sottile fascio elettromagnetico in forma di impulsi radio che, grazie a un meccanismo rotante su cui l'antenna è montata, scandaglia lo spazio circostante. Gli insetti, con dimensioni superiori a una determinata soglia, che vengono intercettati dal fascio riflettono parte delle onde verso l'antenna che può, così, rilevarne la presenza e la posizione. Nelle versioni più moderne, e più specificamente progettate per osservazioni entomologiche, l'antenna rimane fissa, mentre vengono fatte variare in modo controllato le caratteristiche elettromagnetiche delle onde emesse. Con queste configurazioni, analizzando le proprietà dei segnali di eco, è possibile stimare le dimensioni, la densità spaziale e la velocità degli insetti presenti nel raggio di circa 1 km dalla stazione di rilevamento (Riley, 1989; Drake et al., 2002).

Per applicazioni simili, è stato anche considerato l'impiego di fasci di onde sonore per rilevare sciami di insetti mediante sistemi sodar (*sound detection and ranging*), ma con risultati di gran lunga inferiori a quelli ottenuti dall'entomologia radar. Molto più promettente appare l'utilizzo di tecniche acustiche per rilevare la presenza di insetti, sia identificandone la specie di appartenenza, sia quantificandone l'infestazione, mediante lo studio delle proprietà fisiche dei suoni emessi dalla loro attività. Tuttavia, le applicazioni di queste tecniche in campo aperto pongono una serie di problemi tecnici che attualmente precludono il raggiungimento dei risultati conseguiti in ambienti confinati (Mankin et al., 2000; Chesmore e Ohya, 2004; Baker et al., 2005; Mankin et al., 2008).

Sebbene costituiscano uno strumento di formidabile valore per applicazioni entomologiche, è evidente come i sistemi radar, per costo e complessità di gestione, risultano adatti a soli ambiti di monitoraggio su ampia scala spaziale come, a esempio, nel caso delle migrazioni. L'introduzione su scala diffusa di sistemi automatici per il monitoraggio delle popolazioni di fitofagi pone, infatti, stringenti vincoli di costo alle tecnologie che devono essere impiegate. Sono queste le ragioni che hanno indirizzato le più recenti ricerche del settore verso l'impiego di sistemi *optoelettronici*, ossia di sensori ottici integrati con circuiti elettronici dotati di capacità logica o computazionale.

Si tratta di sistemi che, ancora, incontrano le limitazioni applicative precedentemente citate, la principale delle quali è costituita dal volume limitato entro cui possono rilevare la presenza di un insetto. Per questo motivo fonda-

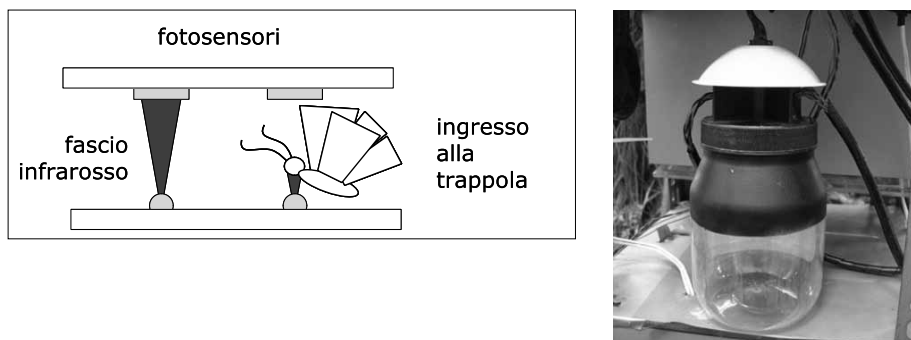


Fig. 6 Sistema optoelettronico per il conteggio automatico degli ingressi in una trappola a cattura contenente un semiochimico attrattivo per il fitofago bersaglio; a destra, il sistema installato in campo per il monitoraggio di popolazioni di *Bactrocera dorsalis* (Jiang et al., 2008)

mentale le soluzioni sviluppate sulla base di queste tecnologie risultano associate a sorgenti semiochimiche o ad altri attrattivi che favoriscano il passaggio di individui della specie oggetto nelle limitate regioni di spazio monitorate.

Ne sono un esempio le unità automatiche di monitoraggio recentemente presentate dalla NASA (Vann et al., 2005) e dall'Università di Taiwan (Jiang et al., 2008). Il primo sistema, che riprende e sviluppa una precedente idea (Moore et al., 1986), si basa sull'attrazione feromonica degli insetti in un contenitore sferico con una superficie interna altamente riflettente, dentro il quale è proiettata in maniera omogenea una luce infrarossa. In corrispondenza di un ingresso, il battito delle ali interferisce con la distribuzione isotropica di luce. Tali alterazioni della radiazione luminosa di fondo vengono registrate da sensori fotoelettrici e analizzate in tempo reale che, determinandone le frequenze caratteristiche, permettono di riconoscere le specie di appartenenza dell'insetto catturato.

Anche il secondo sistema impiega un sensore ottico che, in questo caso, è posto all'ingresso di una classica trappola a cattura contenente una soluzione attrattiva per il fitofago bersaglio (fig. 6). L'accesso alla trappola è conformato in modo tale che, entrando, l'insetto interrompa un fascio di luce infrarossa emesso da LED e rilevato da una coppia di fotodiodi. L'utilizzo di un doppio sensore consente di distinguere gli ingressi effettivi da eventuali avvicinamenti o fughe dalla trappola, grazie all'ordine temporale con cui i fasci vengono interrotti. Un semplice microcontrollore provvede al conteggio progressivo degli eventi rilevati dai sensori e un modem, collegato alla rete telefonica mobile GSM, permette l'interrogazione remota del sistema e la ricezione dei dati registrati dall'unità. La selettività della misura, ossia il fatto di conteggiare individui della sola specie bersaglio, è qui correlata alla specificità attrattiva del semiochimico utilizzato.

Si può notare come entrambe le soluzioni proposte non costituiscano un'innovazione in sé: strumenti simili, già citati nei paragrafi precedenti, sono stati proposti negli anni scorsi per applicazioni di laboratorio. In questo caso – oltre alle ovvie miglierie di prestazioni e ai costi incomparabilmente più bassi che in passato – è il contesto tecnologico a offrire nuove opportunità applicative: la connettività remota, grazie all'impiego di tecnologie di comunicazione come la rete GSM, ne prefigura le potenzialità di un impiego diffuso, a formare reti di monitoraggio distribuite a presidio di comprensori aziendali o territoriali.

Considerazioni analoghe possono essere fatte anche in relazione ad applicazioni di tecniche di *imaging* per la valutazione automatica delle catture. Le prime sperimentazioni condotte (Lukáš e Stejskal, 2003; Cho et al., 2007), che in verità hanno fornito risultati di interesse applicativo assai limitato, hanno mirato a definire opportuni algoritmi di analisi di immagine per l'identificazione e il conteggio automatico degli insetti catturati da una trappola adesiva.

Sebbene il lavoro di queste ricerche, incentrato su aspetti metodologici di analisi dei dati, non affronti il problema tecnico di acquisire automaticamente le immagini dalle trappole in campo, esso apre scenari indubbiamente interessanti. Si possono, infatti, prefigurare sistemi di acquisizione di immagini collegati alla rete telefonica mobile e derivati dalla tecnologia dei cosiddetti videofonini attuali, che vengono impiegati per monitorare la superficie adesiva delle trappole a cattura distribuite negli appezzamenti. Ciascuna di queste unità può essere interrogata remotamente da un computer centrale e inviare, a intervalli predefiniti, un'immagine dello stato di ciascuna trappola monitorata. Il software che analizza le immagini ricevute, residente nel computer centrale, può dunque fornire una quadro di insieme della dinamica delle popolazioni fitofaghe monitorate dalla rete di unità nell'intera area interessata.

#### UN CASO DI STUDIO: UNITÀ AUTOMATICHE DI CAMPO PER IL MONITORAGGIO DI STAZIONI AD ATTRAZIONE FEROMONICA

In questo quadro generale, il Dipartimento di Ingegneria Agraria di Milano ha avviato alcuni anni fa un lavoro di ricerca volto a studiare la fattibilità di una rete di monitoraggio per fitofagi di particolare rilievo nazionale, lavorando direttamente allo sviluppo di unità automatiche di campo associate a stazioni di attrazione feromonica.



Fig. 7 Prototipo dell'unità di monitoraggio automatica installata in meeto per prove di attrazione su *Cydia pomonella* e, a destra, dettaglio del sistema di acquisizione e di illuminazione a infrarossi

La ricerca ha inteso indagare, in primo luogo, la possibilità di sviluppare a costi sostenibili dei sistemi automatici e autonomi – cioè, capaci di operare in un appezzamento agricolo qualunque, senza necessità di supervisione o infrastrutture particolari –, in grado di acquisire e trasmettere a distanza dati relativi a:

- i) l'entità e l'evoluzione temporale della frequentazione delle stazioni di attrazione feromonica da parte degli insetti;
- ii) le modalità comportamentali di frequentazione delle stazioni (tempo di permanenza, traiettorie tipiche, probabilità di entrare in contatto con eventuali erogatori di insetticidi o biocidi ecc.);
- iii) l'esistenza di eventuali condizioni o fattori di repellenza che limitano l'efficacia di attrazione o contaminazione.

La funzionalità in campo di un tale sistema pone, naturalmente, stringenti vincoli operativi alle possibili soluzioni tecnologiche individuate, fra i quali: non interferire con i meccanismi di attrazione e di eventuale contaminazione degli insetti; operare anche durante le ore notturne, dato che molti fitofagi prediligono condizioni di oscurità; consentire l'interrogazione, la trasmissione dei dati e la configurazione del sistema a distanza, senza cioè richiedere di recarsi in campo; funzionare in modo completamente automatico, con un'autonomia nell'ordine della durata di un'intera stagione colturale; avere un'alimentazione elettrica autonoma.

Il principio di funzionamento delle unità realizzate si basa sull'acquisizione e l'analisi in tempo reale di immagini infrarosse della stazione di attrazione e del volume circostante. L'uso della banda ottica del vicino in-

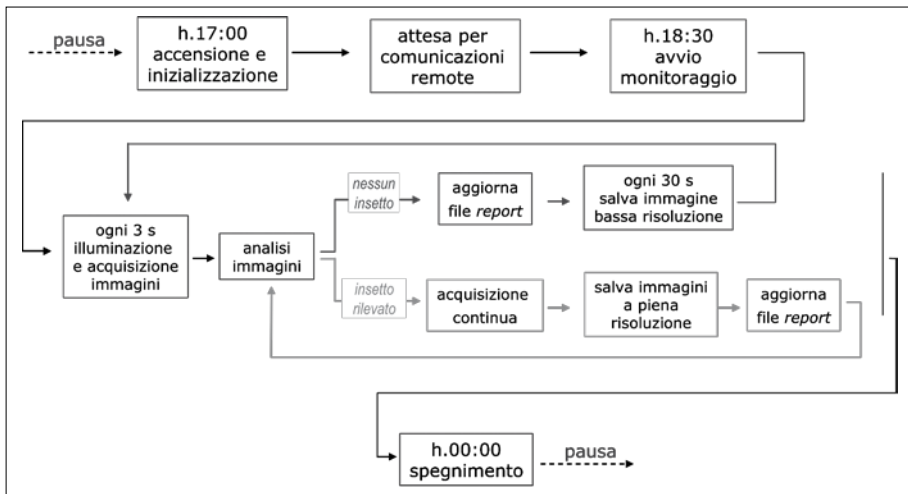


Fig. 8 *Diagramma di funzionamento dell'unità di acquisizione nel caso di monitoraggio di un insetto a volo crepuscolare*

frarosso, regione spettrale invisibile agli insetti, permette di illuminare il volume monitorato senza generare stimoli luminosi o termici che possano interferire coi meccanismi attrattivi del semiochimico. Inoltre, questa banda spettrale risulta compatibile con l'impiego di comuni telecamere digitali basate su sensori al silicio, senza dovere ricorrere a strumenti più sofisticati e costosi.

Il sistema (fig. 7) è costituito da telecamere monocromatiche digitali e illuminatori LED ed è gestito da un computer embedded – ossia un piccolo computer dotato di hardware semplificato e specializzato per operazioni di automazione –, dotato di modem GSM e installato in un contenitore a tenuta stagna. Il sistema è alimentato da un pannello fotovoltaico e da una batteria di accumulo.

Ciascuna unità è dotata di due telecamere che inquadrano due diverse regioni della stazione di attrazione: una provvede ad acquisire immagini a elevata risoluzione dell'intorno dell'erogatore di semiochimico, mentre una seconda telecamera tiene monitorata la regione di avvicinamento alla stazione di attrazione, fornendo immagini a risoluzione più moderata delle zone di accesso alla stazione stessa.

I requisiti di autonomia di funzionamento a lungo termine, impongono una gestione dell'unità da parte del computer che ottimizzi l'uso della memoria, dove vengono registrati i dati, e soprattutto dell'energia assorbita. Pertanto, il sistema resta normalmente inattivo e si avvia automaticamente

solamente durante le ore programmate per il monitoraggio, in dipendenza dalle abitudini delle specie fitofaghe considerate.

Il diagramma in figura 8 riassume schematicamente il principio di funzionamento dell'unità, riferendosi al caso esemplificativo di applicazione a un insetto con volo crepuscolare: dopo l'avvio all'ora programmata, il computer resta in attesa di eventuali connessioni telefoniche da parte di un PC remoto, durante le quali un operatore può modificare i parametri operativi o scaricare a distanza i dati precedentemente acquisiti dal sistema. Con l'attivazione della modalità di monitoraggio vera propria, l'unità acquisisce ogni tre secondi le immagini delle regioni inquadrare che vengono illuminate da un impulso luminoso emesso dai LED infrarossi.

Ogni immagine acquisita viene immediatamente analizzata per rilevare l'eventuale presenza di insetti nelle regioni di interesse. Qualora il software non identifichi alcuna presenza, l'unità trascrive il risultato in un file di *report* insieme ad alcuni parametri operativi che permettono di verificarne il corretto funzionamento. Nel caso, invece, venga rilevata la presenza di un insetto, l'unità registra l'evento nel file di report e avvia l'acquisizione continua delle immagini che vengono memorizzate a piena risoluzione. Ciò, fino al termine della visita, quando il sistema torna nella modalità di monitoraggio con l'acquisizione di immagini alla frequenza di campionamento. Al termine del periodo di funzionamento programmato, l'unità si spegne automaticamente.

L'individuazione automatica della presenza di un insetto si basa su un algoritmo piuttosto semplice (fig. 9) che ha rivelato una notevole affidabilità di funzionamento (Oberti et al., 2008). Esso prevede la costruzione di immagini di sfondo, corrispondenti alla regione monitorata sgombra da ogni visita, che sono ottenute come media mobile delle ultime 200 immagini acquisite. Tali immagini, dunque, si aggiornano continuamente, adattandosi alle variazioni di illuminazione, come avviene durante le ore crepuscolari, o a modificazioni dello sfondo stesso, a esempio a causa di corpi estranei che si depositano dentro la stazione stessa, dato che ogni variazione non temporanea della scena viene inglobata nell'immagine di sfondo nel giro di qualche minuto.

A ogni immagine acquisita dalle telecamere viene sottratto lo sfondo corrispondente e il risultato ottenuto è, poi, sottoposto ad alcune semplici operazioni di soglia dimensionale e di intensità. Gli eventuali oggetti che, al termine di tali operazioni, permangono nell'immagine finale sono assunti corrispondere a uno o più insetti presenti nelle regioni monitorate.

I limiti di velocità nella trasmissione dati, intrinseci alla rete telefonica



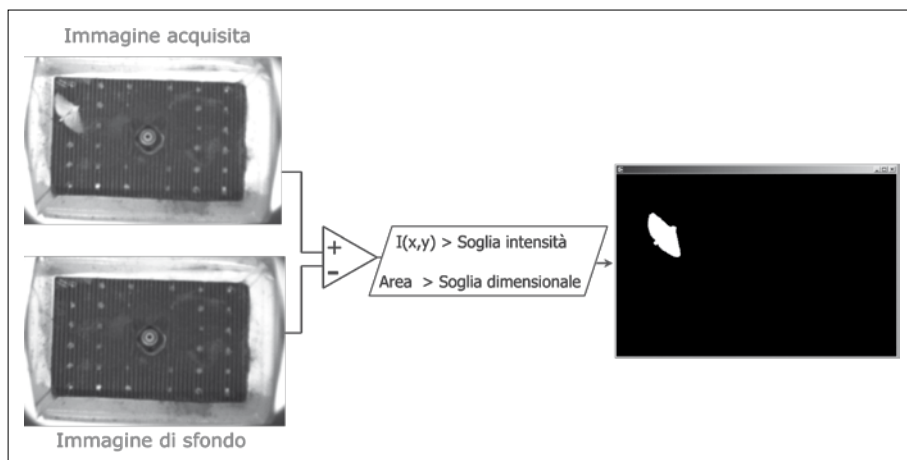


Fig. 9 L'algoritmo di individuazione automatica della presenza di insetti nelle immagini acquisite è basato sulla sottrazione dello sfondo e su semplici operatori di soglia

mobile GSM, non permettono di scaricare direttamente le immagini acquisite in campo, ma è tuttavia possibile accedere tramite un computer remoto ai file di *report* generati quotidianamente dall'unità stessa. I dati contenuti in questi file riassumono i risultati registrati dal sistema e permettono di ottenere informazioni tempestive riguardo il numero di visite rilevate e la loro durata, oltre a consentire di verificare il corretto funzionamento del sistema in campo, così da limitare i sopralluoghi di verifica al sito di monitoraggio al solo caso di avarie o malfunzionamenti.

Le unità sviluppate sono state sperimentate in diverse prove di campo condotte su alcuni fitofagi di primaria importanza per le colture orto-frutticole italiane, quali *Cydia pomonella*, *Lobesia botrana* e *Spodoptera littoralis*, utilizzando attrattori feromonici specifici per queste specie.

Oggetto specifico di queste prove, è stato il monitoraggio di stazioni di attrazione e contaminazione, funzionanti secondo un approccio innovativo di difesa definito *auto-disseminazione*. Questo prevede che il fitofago, richiamato dal semiochimico, si contaminerà con un insetticida a lenta azione, provvedendo a disseminarlo attraverso la popolazione per contatti successivi, soprattutto nelle fasi di accoppiamento, oppure depositandolo in micro-habitat difficilmente raggiungibili dai classici trattamenti a nebulizzazione, quali a esempio i siti di ovodeposizione.

L'utilizzo delle unità automatiche ha, dunque, avuto un duplice scopo: da un lato, monitorare la popolazione fitofaga, registrando la dinamica temporale delle visite, e, dall'altro, stimare la probabilità di contaminazione con

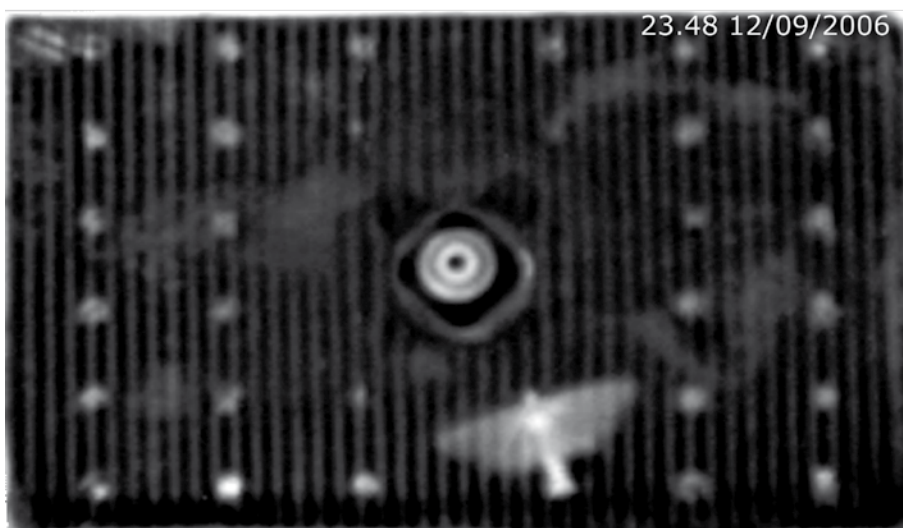


Fig. 10 *Registrazione di un ingresso notturno di Spodoptera in una stazione di attrazione durante una prova su cavolo. Nel centro dell'immagine infrarossa si nota l'erogatore di feromone, mentre lo sfondo è costituito dalla polvere insetticida*

l'insetticida, registrando il comportamento dell'insetto una volta entrato nella stazione.

La figura 10 mostra, a titolo di esempio, un'acquisizione ottenuta in corrispondenza di un ingresso notturno di un esemplare di *Spodoptera* in una delle stazioni di attrazione monitorate. Lo sfondo dell'immagine infrarossa mostrata è costituito dal vassoio contenente la polvere insetticida adesiva, mentre nel centro si può notare l'erogatore di semiochimico.

La figura 11 mostra, invece, due grafici relativi all'andamento della dinamica delle visite registrate e ottenuti in tempo reale durante lo svolgimento delle prove, grazie ai dati quotidianamente ricevuti dalle unità di campo mediante connessione remota. Il grafico di sinistra si riferisce a prove su *Spodoptera* e rappresenta uno dei primi esempi di risultati operativi ottenuti in campo con l'unità qui presentata. Da tali dati, a esempio, è stato possibile evincere una forte correlazione tra l'interazione fitofago/semiochimico e le condizioni meteorologiche del sito, in particolare con livello di precipitazioni.

Assai interessante da un punto di vista applicativo è il grafico a destra di figura 11, riferito a prove su *Lobesia* condotte utilizzando due diverse formulazioni che sono state alternate nel corso della prova: la formulazione A consi-

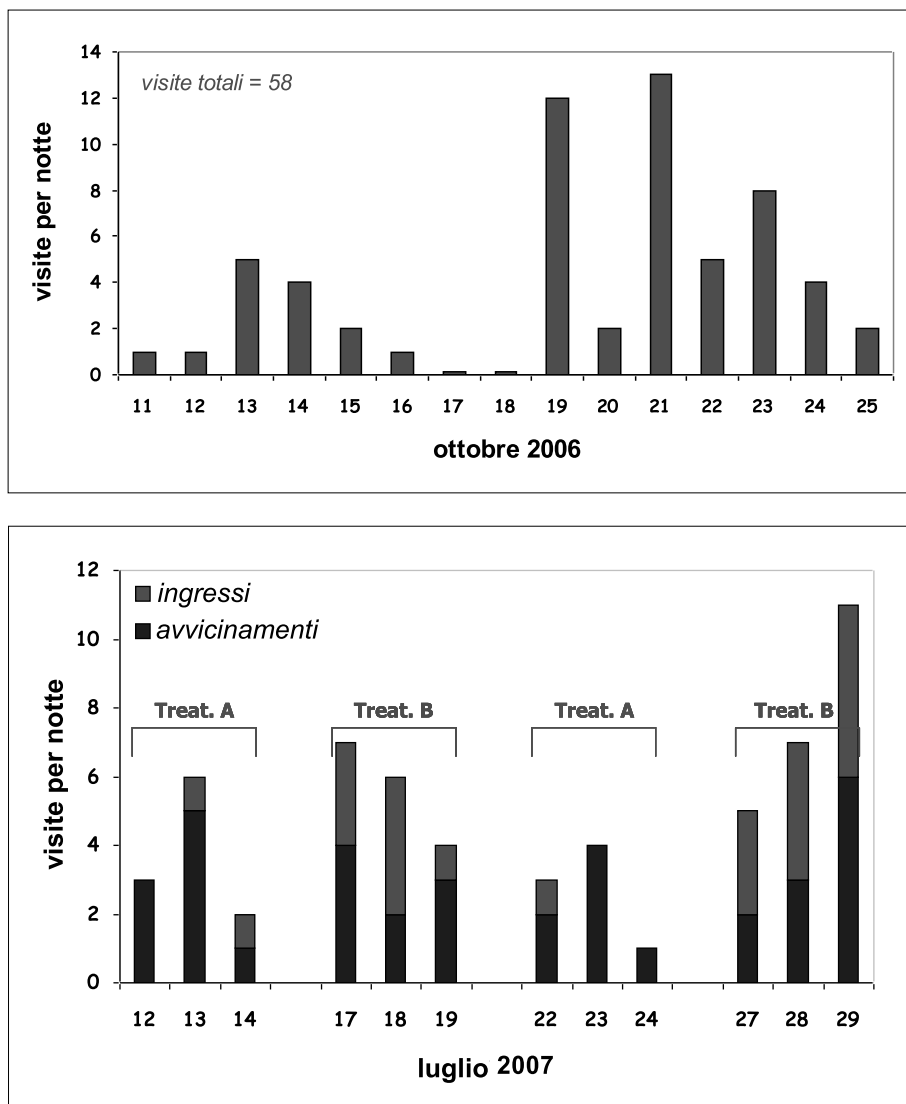


Fig. 11 *A sinistra, dinamica temporale degli ingressi di Spodoptera registrati in una stazione di attrazione durante una prova autunnale. A destra, registrazioni di avvicinamenti e ingressi di Lobesia in una stazione di attrazione ottenuti con l'impiego di due diverse formulazioni di semiochimico e insetticida*

steva in un vassoio contenente insetticida miscelato al semiochimico, mentre nella formulazione B l'erogatore del medesimo semiochimico era mantenuto separato dal vassoio insetticida. Sebbene di carattere soltanto preliminare, i

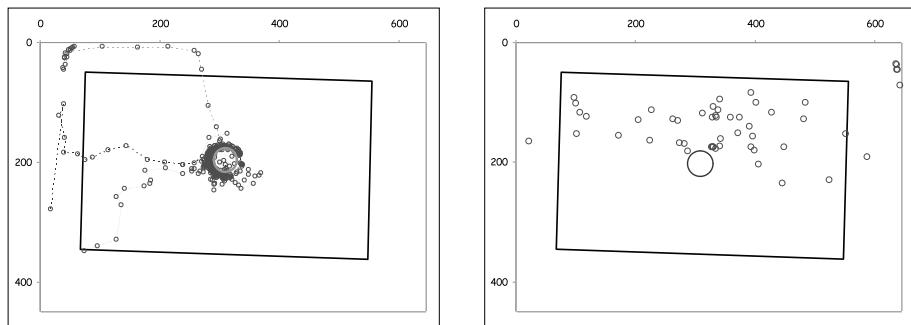


Fig. 12 Dall'analisi delle sequenze di immagini corrispondenti a una singola visita è possibile ricostruire la traiettoria dell'insetto nell'intorno dell'attrattivo. Nei due grafici le coordinate sugli assi sono espresse in punti immagine (pixel); il rettangolo nero rappresenta il vassoio contenente l'insetticida; il cerchio centrale rappresenta l'erogatore di feromone

dati registrati indicano come le due formulazioni mostrino una simile capacità attrattiva nei confronti dell'insetto (dati in blu, relativi al numero di avvicinamenti). Tuttavia, quando si considerano gli ingressi nella stazione di contaminazione (dati in rosso) si evidenzia come la formulazione A manifesti una qualche azione repellente che, relativamente al trattamento B, ne riduce la potenziale efficacia fitoprotettiva.

Sebbene necessitino di ulteriori conferme, questi dati rappresentano un risultato di primaria importanza della ricerca condotta e prefigurano le potenzialità offerte dalle unità di monitoraggio sviluppate in termini di comprensione dell'efficacia di attrazione dei semiochimici in campo e della interazione fra fitofago e insetticida ai fini dello sviluppo di tecniche di auto-disseminazione.

Una volta scaricate le immagini dalle unità è, poi, possibile analizzare le sequenze corrispondenti a ciascuna visita registrata, al fine di ricostruire la traiettoria mantenuta dall'insetto in prossimità e all'interno della stazione di attrazione. La figura 12 mostra due esempi dei risultati che si ottengono in questo modo, per i quali si possono riconoscere: in un caso (fig. 12, a sinistra) una permanenza insistita dell'insetto sull'erogatore di feromone e sul bordo del vassoio, il che implica forti limitazioni nella probabilità di contaminazione con il principio attivo contenuto nel vassoio; nel secondo caso (fig. 12, a destra) si manifesta un comportamento più indifferente rispetto all'attrattivo, con movimenti lungo l'intero tappeto contaminante.

Dall'analisi di questo tipo di dati è emerso, a esempio, come semplici modifiche all'architettura delle stazioni (quali l'ampliamento del vassoio con-

tenente l'insetticida fino a coprire l'intera superficie calpestabile, oppure la riduzione dell'altezza dell'erogatore di semiochimico) possano rivelarsi utili per massimizzare la probabilità di contaminazione dell'insetto.

Anche in questo senso, cioè nell'ottimizzare le tecnologie o i sistemi di erogazione, si evidenzia come tali unità di monitoraggio possano contribuire fattivamente a migliorare l'efficacia di strategie innovative di difesa basate sui semiochimici.

## CONCLUSIONI

Le acquisizioni ottenute da recenti ricerche mostrano la possibilità di estendere l'applicazione di tecnologie automatiche di monitoraggio dal laboratorio, dove si utilizzano già da alcuni decenni, alle condizioni di campo aperto. In tal senso, i sistemi basati su tecnologie optoelettroniche emergono come soluzioni di primario interesse quando vengono associati all'impiego di semiochimici. Ciò, grazie alla possibilità di disporre, a costi relativamente contenuti, di strumenti in grado di rilevare otticamente il passaggio o la presenza di insetti in volumi confinati, una volta che vi vengano attratti da semiochimici specie-specifici.

I risultati ottenuti con strumenti più complessi, basati su tecnologie di *imaging*, mostrano come tali sistemi possano contribuire in maniera decisiva allo sviluppo di nuove strategie di difesa dai fitofagi basate su semiochimici. Per altro, le esperienze condotte prefigurano la possibilità di sviluppare sistemi di *imaging* semplificati e di costo contenuto, finalizzati a un loro utilizzo all'interno di reti di monitoraggio remoto: è possibile, infatti, pensare a unità di monitoraggio delle popolazioni fitofaghe distribuite sul territorio e collegate a un server centrale mediante, a esempio, la rete telefonica mobile. Il computer centrale elaborando in tempo reale i dati provenienti da ogni unità e integrandoli con informazioni complementari – relative alle condizioni micro-meteorologiche, alla distribuzione e al tipo di colture in atto, a modellizzazioni epidemiologiche ecc. –, può fornire un supporto fondamentale per prendere decisioni tempestive e mirate a difesa delle colture (fig. 13).

Appare del tutto evidente il ruolo cruciale che le tecnologie dell'informazione e della comunicazione giocano nelle possibilità di sviluppo di un tale approccio innovativo, fornendo, a costi sostenibili, sistemi affidabili capaci di trasmettere a distanza ed elaborare sinteticamente i dati di campo.

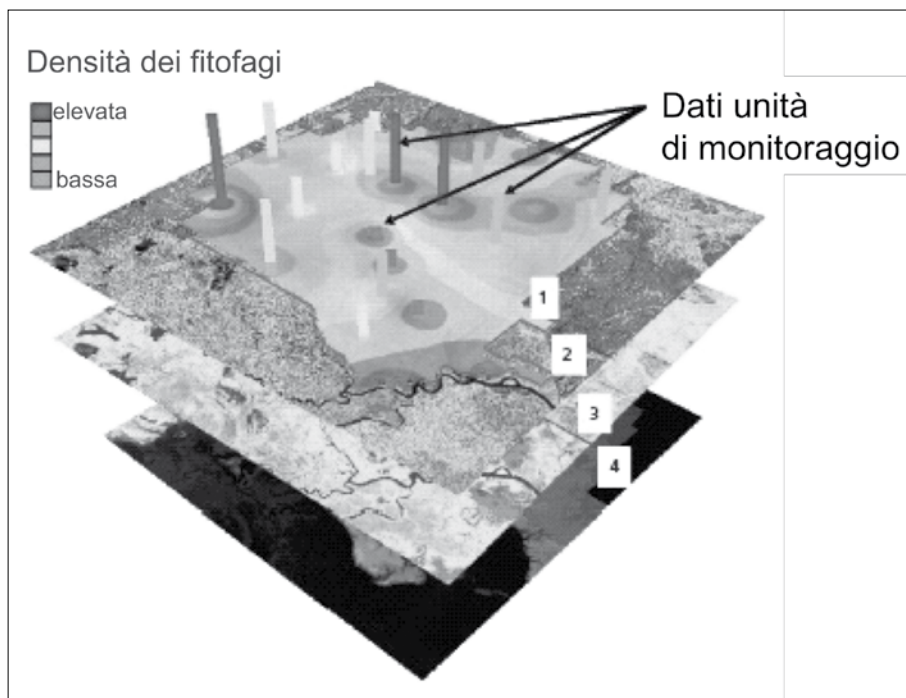


Fig. 13 *L'elaborazione di dati acquisiti in tempo reale da unità automatiche di campo, integrati con informazioni complementari relative al territorio monitorato, può fornire un supporto fondamentale per prendere decisioni tempestive e mirate a difesa delle colture*

E in modo altrettanto evidente, infine, si manifesta come prerequisito essenziale per il raggiungimento di risultati così ambiziosi e per ogni loro futuro trasferimento applicativo, l'integrazione multidisciplinare di competenze tecnologiche, biologiche, chimiche e ambientali

#### RIASSUNTO

L'osservazione e l'analisi delle risposte degli insetti agli stimoli ambientali, chimici e fisici, costituisce da sempre la base di conoscenza fondamentale per la messa a punto di efficaci pratiche di difesa delle colture dai fitofagi. Sebbene da qualche decennio siano stati sviluppati strumenti di misura a supporto delle ricerche entomologiche di laboratorio, in campo aperto il monitoraggio dei fitofagi viene tuttora condotto mediante osservazioni visuali.

Gli sviluppi delle ricerche in questo settore hanno recentemente portato a dimostrare la fattibilità di unità automatiche di campo dedicate a questo scopo. Associati all'impiego di semiochimici, questi sistemi possono contribuire in maniera decisiva a migliorare le

nostre conoscenze riguardo i meccanismi di interazione tra attrattivo e insetto e preconizzano lo sviluppo di nuove strategie di difesa dai fitofagi basate su semiochimici e gestite mediante reti di monitoraggio distribuite sul territorio.

#### ABSTRACT

The observation and analysis of responses of insects to environmental, chemical and physical stimuli has always represented the fundamental basis of knowledge to develop effective crop protection practices from pests insects. Although measurements technologies have been introduced in entomological laboratories since a few decades, field monitoring of pests is still conducted through visual observations.

The recent research progresses in this area has recently demonstrated the feasibility of automatic field units dedicated to this purpose. The use of these systems associated with semiochemicals may provide a fundamental contribution to improve our knowledge about the mechanisms of interaction between attractant and insect and to disclose the implementation of new semiochemical-based crop protection strategies, managed by field monitoring networks.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BAKER R., CANNON R., BARTLETT P., BARKER I. (2005): *Novel strategies for assessing and managing the risks posed by invasive alien species to global crop production and biodiversity*, «Annals of Applied Biology», 146, pp. 177-191.
- CHABORA P.C., SHUKIS A.A. (1979): *The automated recording of insect activity: the house fly*, «Ann. Entomol. Soc. Am.», 72, pp. 287-290.
- CHESMORE E.D., OHYA E. (2004): *Automated identification of field-recorded songs of four British grasshoppers using bioacoustic signal recognition*, «Bulletin of Entomological Research», 94, pp. 319-330.
- CHO J., CHOI J., QIAO M., JI C., KIM H., UHM K., CHON T. (2007): *Automatic identification of whiteflies, aphids and thrips in greenhouse based on image analysis*, «Int. Jour. Math. Comp. Simulat.», 1, pp. 46-53.
- DAVID C.T., KENNEDY J.S., LUDLOW A.R. (1983): *Finding of a sex pheromone source by gypsy moths in the field*, «Nature», 303, pp. 804-806.
- DRAKE V.A., HARMAN I.T., WANG H.K. (2002): *Insect monitoring radar: stationary-beam operating mode*, «Comput. Electron. Agric.», 35, pp. 111-137.
- EATON J.L. (1980): *An infrared LED-based electronic actograph for monitoring insect flight activity*, «Ann. Entomol. Soc. Am.», 73, pp. 744-746.
- FRY S.N., BICHSEL M., MULLER P., ROBERT D. (2000): *Tracking of flying insects using pan-tilt cameras*, «Journ. Neuroscience Methods», 101, pp. 59-67.
- GODDEN D.H. e GRAHAM D. (1983): *Instant analysis of movement*, «Journ. Exp. Biol.», 107, pp. 505-508.
- HARRINGTON R., WOIWOD I. (2007): *Foresight from hindsight: The Rothamsted Insect Survey*, «Outlooks on pest management», 18, pp. 9-14.

- HOY J.B., GLOBUS P.A., NORMAN K.D. (1983): *Electronic tracking and recording system for biological observation with application to toxicology and pheromone assay*, «Journ.Econ. Entomol.», 76, pp. 678-680.
- JIANG J., TSENG C., LU F., YANG E., WU Z., CHEN C., LIN S., LIN K., LIAO C. (2008): *A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, Bactrocera dorsalis (Hendel)*, «Comput. Electron. Agric.», 62, pp. 243-259.
- JOHNSON M., TOSCANO N., JONES C., BAILEY J. (1986): *Modified ultrasonic actograph for monitoring activity of lepidopterous larvae*, «Proc. Hawaiian Entomol. Soc.», 27, pp. 141-146.
- KANEKO S., INO M., TAKAMIZAWA Y. (1995): *Three sensitive actographs for cockroaches*, «Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.», 1995, 3, pp. 65-73.
- LEPPLA N., HAMILTON E., GUY R., LEE F. (1979): *Circadian rhythms of locomotion in six noctuid species*, «Ann. Entomol. Soc. Am.», 72, pp. 209-215.
- LUFF M., MOLYNEUX L., BALL S. (1979): *An ultrasonic insect movement detector*, «Physiol. Entomol.», 4, pp. 147-153.
- LUKÁŠ J., STEJSKAL V. (2003): *Computer-based image analysis to estimate the area of a sticky trap occupied or contaminated by pests*, «Plant Protect. Sci.», 39, pp. 52-60.
- MANKIN R.W., BRANDHORST-HUBBARD J., FLANDERS K.L., ZHANG M., CROCKER R.L., LAPOINTE S.L., MCCOY C.W., FISHER J.R., WEAVER D.K. (2000): *Eavesdropping on insects hidden in soil and interior structures of plants*, «Jour. Econ. Entomol.», 93, pp. 1173-1182.
- MANKIN R.W., SMITH M.T., TROPP J.M., ATKINSON E.B., JONG D.Y. (2008): *Detection of Anoplophora glabripennis (Coleoptera: Cerambycidae) larvae in different host trees and tissues by automated analyses of sound-impulse frequency and temporal patterns*, «Jour. Econ. Entomol.», 101, pp. 837-849.
- MOORE A., MILLER J. R., TABASHNIK B. E., GAGE S. H. (1986): *Automated identification of flying insects by analysis of wingbeat frequencies*, «J. Econ. Entomol.», 79, pp. 1703-1706.
- OBERTI R., NALDI E., BODRIA L. (2008): *Automatic remote monitoring of attractant-based insecticide delivering systems*, Proc. of AgEng2008, Paper OP-1800, Ed. AgEng, International Conference on Agricultural Engineering, Crete June 2008.
- RACETTE G., HILL S., VINCENT C. (1990): *Actographs for recording daily activity of plum Curculio (Coleoptera: Curculionidae)*, «Journ. Econ. Entomol.», 83, pp. 2385-2392.
- RILEY J.R., SMITH A.D. (2002): *Design considerations for an harmonic radar to investigate the flight of insects at low altitutte*, «Comput. Electron. Agric.», 35, pp. 151-169.
- RILEY J.R. (1989): *Remote sensing in entomology*, «Ann. Rev. Entomol.», 34, pp. 247-71.
- VANN T., ANDREWS J.C., HOWELL D., RYAN R. (2005): *An Automated Flying-Insect-Detection System*, [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050203857\\_2005201775.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050203857_2005201775.pdf)
- VICKERS N.J., BAKER T.C. (1997): *Flight of Heliothis virescens males in the field in response to sex pheromone*, «Physiol. Entomol.», 22, pp. 277-285.
- VOSS R. and ZEIL J. (1995): *Automatic tracking of complex objects under natural conditions*, «Biol. Cybern.», 73, pp. 415-423.
- WHEATER C.P. (1988): *Measurement of the activity of mesofauna using an actograph-micro-computer system*, «Pedobiologia», 31, pp. 219-222.
- ZANEN P.O., CARDÉ R.T. (1999): *Directional control by male gypsy moths of upwind flight along a pheromone plume in three wind speeds*, «Journ. Comp. Physiol.», A 184, pp. 21-35.



## Trasferimento agli operatori di nuovi sistemi di difesa fitosanitaria basati su tecnologie di monitoraggio: sfide industriali e benefici per l'agricoltura

### IL MONITORAGGIO AUTOMATICO DELLE POPOLAZIONI D'INSETTI: DAL BISOGNO ALL'IDEA

La ricerca e lo sviluppo di nuove tecniche di contenimento delle popolazioni di parassiti delle colture agrarie e forestali pongono sempre più attenzione al ruolo che i semiochimici hanno nella biologia e nel comportamento degli insetti, e nella relazione che essi determinano sia fra individui della stessa specie (feromoni), sia fra specie diverse e fra insetti e piante (caiomoni, sinomoni).

Gli studi mirano anche a comprendere come avviene, nell'ambito di ciascuna specie, l'attrazione selettiva nei confronti di forme diverse (larve e adulti), di adulti diversi (maschi, femmine vergini e femmine fecondate), fasi generazionali diverse (ovideposizione su vegetazione e ovideposizione su frutti), ecc.

Dal punto di vista pratico, l'approfondimento di queste conoscenze ha come primo obiettivo finale la messa a punto di tecniche di difesa fitoiatrice che con sempre maggiore precisione colpiscano solo ed esclusivamente le specie parassite che potrebbero causare un danno economico rilevante alle colture.

L'idea di sviluppare un sistema di monitoraggio automatico "in-field" nacque durante lo studio di una tecnica "attract and kill" per lepidotteri fitofagi; nella fase di progettazione della stazione di attrazione era necessario verificarne l'effettivo funzionamento in campo e capire come si svolgessero le diverse fasi di avvicinamento, ingresso, frequentazione e allontanamento.

\* *Phloema srl*

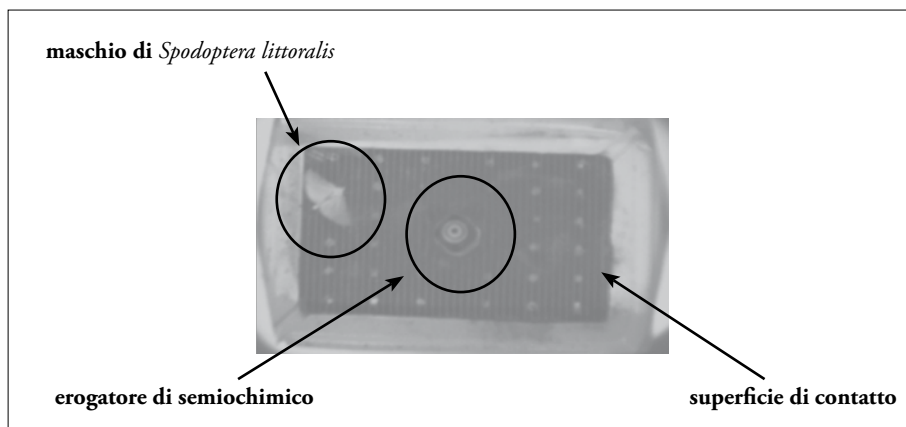


Fig. 1 Immagine da rilevazioni su coltura di cavolo (Ist. di Ingegneria Agraria, Univ. degli Studi di Milano)

L'insetto doveva essere lasciato libero di entrare, muoversi all'interno della stazione di attrazione e quindi di allontanarsene, bisognava quindi trovare un modo per osservare i suoi comportamenti senza disturbarlo.

Bisognava inoltre rilevare tutte le presenze d'insetti monitorando la stazione con continuità e per un lungo periodo, ed era necessario che il sistema di monitoraggio funzionasse in autonomia, consentendo di ridurre al minimo gli interventi di controllo, manutenzione e sostituzione di componenti esau-

ste. Ancora, i dati raccolti dovevano essere disponibili presso un centro di elaborazione "in tempo reale", per tutte le valutazioni relative al funzionamento sia del sistema di monitoraggio sia di quello monitorato.

Definiti questi obiettivi, l'Istituto di Ingegneria Agraria dell'Università degli Studi di Milano ha progettato e realizzato un sistema digitale integrato di rilevazione video all'infrarosso freddo per rilevare presenza e comportamento degli insetti all'interno della stazione di attrazione; questa stazione era costituita da un erogatore di semiochimico posto al centro di un vassoio con il quale l'insetto avrebbe dovuto venire a contatto.

Le immagini rilevate venivano trasmesse a un centro di controllo, allestito presso lo stesso Istituto di Ingegneria Agraria, a più di 200 km di distanza dal sito di rilevazione, un pereto a normale conduzione (Oberti et al., 2008).

Lo strumento ha registrato e trasmesso in continuo le attività all'interno della stazione di attrazione per il lungo periodo desiderato, superiore a 45 gg: in questo modo è stato possibile valutare la performance attrattiva del semiochimico, l'arrivo dell'insetto nella stazione e il suo comportamento all'interno

di essa, il contatto con la superficie del vassoio, il tempo di permanenza, la fase di allontanamento.

Il sistema ha inoltre fornito informazioni sulla presenza e l'effetto di altri fattori che potessero condizionare la relazione insetto-stazione sopra citata, come la presenza contemporanea di più individui della specie target, l'eventuale azione di disturbo di altre specie, il deterioramento del sito.

Partendo da questa prima positiva esperienza si è cercato di dare impulso allo sviluppo della tecnologia di monitoraggio e all'identificazione delle applicazioni alle quali essa può essere destinata, in funzione dei benefici che ne ricaverebbero la ricerca, lo sviluppo di nuove tecniche fitoiatriche, il controllo e la protezione del territorio e delle colture, la formazione e l'informazione degli operatori nei settori agricolo e forestale.

#### MONITORAGGIO AUTOMATICO E SVILUPPO DI NUOVI SISTEMI DI DIFESA

Come già detto in precedenza una delle grandi linee di sviluppo di tecniche fitoiatriche "di precisione" si appoggia alla ricerca e alle conoscenze sui semiochimici.

Gli sforzi di ricerca e sviluppo di queste tecniche hanno preso direzioni varie e diversificate, possiamo provare a circoscrivere le aree maggiormente investigate.

Nella messa a punto di queste tecniche si pone attenzione soprattutto ai semiochimici attivi sulle forme più mobili della specie target, quindi gli adulti. Questo perché da un punto di vista pratico risulta poco interessante l'uso di semiochimici attivi su forme dell'insetto caratterizzate da ridotta mobilità, specie quando gli obiettivi sono il monitoraggio e la protezione di vasti comprensori agrari o forestali.

Il *focus* sugli adulti, spesso genericamente definiti per semplicità di esposizione, deve naturalmente tenere in grande attenzione le diverse biologia e mobilità di maschi e femmine. E queste differenze possono anche essere sfruttate ai fini di una gestione dei parassiti sempre più precisa e priva di effetti collaterali.

Si possono infatti mettere a punto sistemi di attrazione attivi solo nei confronti degli individui che influiscono direttamente sulla dimensione del danno, ad esempio le femmine vergini e pronte per la fecondazione oppure le femmine fecondate prossime all'ovideposizione.

Approfondimento delle conoscenze sui semiochimici e sviluppo delle tecniche di monitoraggio automatico sono fra loro legati a doppio filo: i semio-

chimici, e più nello specifico quelli che esercitano un'azione di attrazione verso la sorgente di emissione, sono componente integrante e irrinunciabile del sistema di monitoraggio automatico (e di quasi tutti i sistemi di monitoraggio): l'insetto deve essere attratto all'interno della zona d'azione dello strumento di rilevazione e questo avviene mediante l'uso di stimoli chimici. È la sostanza a determinare ciò che si attrae, hardware e software ne rilevano e classificano la presenza.

Parallelamente, lo studio sui semiochimici e la messa a punto di tecniche di attrazione trovano nella precisione delle tecniche di rilevazione un supporto fondamentale. Esse possono infatti aiutare a comprendere la dinamica attrattiva e la risposta dell'insetto all'attrazione; i fattori che condizionano questa risposta, la possibilità di abbinare all'attrazione altri obiettivi – ad es. contatto con insetticidi o spore di entomopatogeni –, l'effettiva contaminazione con questi preparati, ciò che accade dopo il contatto, ecc.

Sono state sinora identificate due possibili tecniche di monitoraggio digitale.

La prima tecnica, già descritta sopra, è stata definita *attract, monitor and release*, e ha lo scopo di rilevare il comportamento dell'insetto libero di muoversi nella stazione, di allontanarsi ed eventualmente di ritornarvi.

Questa tecnica sembra essere adatta allo sviluppo di metodi di difesa innovativi – ad esempio quelli basati sull'autodisseminazione – là dove è utile rilevare la presenza dell'insetto e le dinamiche di popolazione, ma è altrettanto importante studiarne i comportamenti e fare in modo che gli individui rimangano vivi e vitali per un tempo desiderato.

Il solo sistema di rilevazione non è naturalmente in grado, almeno per il momento, di distinguere i “nuovi visitatori” dai “frequentatori abituali”. Un'ipotesi per ovviare a questo problema, è quella di marcare l'insetto entrato nella stazione con un tracciante che sia rilevabile dalla telecamere (es. sostanza fluorescente) e che non alteri la sua mobilità e il suo comportamento.

La seconda tecnica, *kill and monitor*, rileva la presenza dell'insetto in trappole di cattura; lo strumento fotografa le trappole a intervalli predefiniti e l'immagine del reticolo con gli insetti catturati viene inviata al database del centro di controllo.

Questa tecnica può fare uso di attrezzature di complessità e costi più bassi della precedente, e appare applicabile alle situazioni nelle quali la conta degli adulti catturati è informazione sufficiente. Un esempio è il monitoraggio di controllo che si fa quando si applica la confusione sessuale: la presenza di individui nelle trappole indica che la tecnica della confusione non è efficace e che bisogna intervenire con l'applicazione di insetticidi.

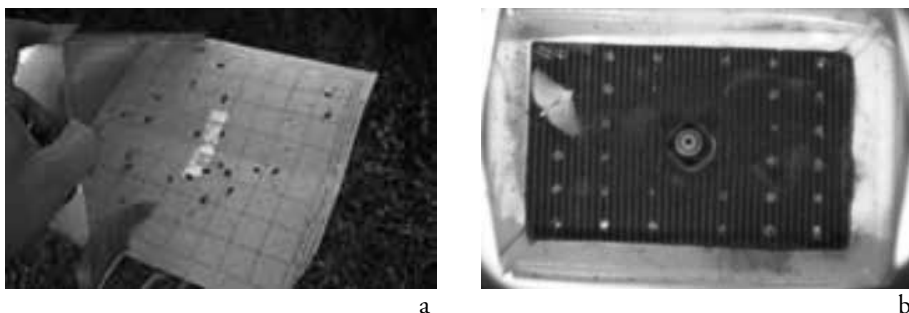


Fig. 2 a) *Trappola a cattura* (ISCA Corp. – USA) b) *Monitor & release* (Ing. Agraria - Univ. degli Studi Milano)

Rispetto ai rilievi visivi in campo la tecnica offre il vantaggio di conte in automatico con la frequenza desiderata e permette di archiviare le informazioni originarie per eventuali verifiche.

Essa presenta al momento il limite di richiedere frequenti pulizia e manutenzione delle trappole.

#### MONITORAGGIO AUTOMATICO E INDAGINE ENTOMOLOGICA

Abbiamo sinora parlato dell'acquisizione automatica delle immagini come strumento utile a nuovi sistemi di difesa fitoiatrica, ma questa non ci sembra essere l'unica applicazione alla quale questo tipo di monitoraggio può portare benefici.

La tecnica *attract, monitor and release*, attraverso la quale si rileva l'insetto in modo "non invasivo", come viceversa avviene nel monitoraggio con le trappole classiche, sembra essere adatta anche a studi "in-field" con finalità di ricerca entomologica.

La possibilità di tenere costantemente sotto osservazione più siti sul territorio può essere importante per studi anche complessi sulle dinamiche delle popolazioni.

I sistemi di monitoraggio automatico "in field" possono essere ad esempio customizzati e usati per analisi di popolazioni e metapopolazioni e per studi sulle dinamiche e le interazioni che le caratterizzano; per studi di shift genetici e fenologici; per verificare la colonizzazione di ambienti da parte di specie esogene, e/o per analizzare il rischio di scomparsa di specie indigene e riduzione della biodiversità; per studiare il cambiamento delle barriere geografiche; per tenere sotto controllo specie-indicatori ecologici.

#### APPLICAZIONE DEL MONITORAGGIO AUTOMATICO: IN QUALI CASI E CON QUALI BENEFICI?

Abbiamo provato a identificare applicazioni pratiche della rilevazione automatica delle immagini, cercandone l'utilità e provando a identificarne i possibili benefici per l'agricoltura e per la gestione del verde e del patrimonio forestale. Abbiamo anche provato a ragionare sui limiti della tecnologia.

L'esercizio che abbiamo fatto, che definiremmo di "creatività applicativa", presenta tutti i limiti e i difetti che normalmente accompagnano le attività dell'immaginazione, ma può essere molto utile a guidare ogni futuro approfondimento nello sviluppo della tecnologia.

#### SVILUPPO DI TECNICHE FITOIATRICHE "DI PRECISIONE"

Abbiamo già descritto come l'idea stessa di una tecnologia di monitoraggio automatico sia nata dalle esigenze di verifica del funzionamento di sistemi di tipo "attract and kill" e di autodisseminazione.

Molte sono le soluzioni di distribuzione mirata degli insetticidi a individui attratti da semiochimici che sono state indagate e proposte al mercato. Di queste alcune hanno dimostrato efficacia, flessibilità e semplicità d'impiego tali da ottenere anche elevata diffusione.

Fra le tecniche di questo tipo le più sperimentate sono:

1. quelle basate sull'attrazione mediante feromoni sessuali;
2. quelle che usano attrattivi alimentari e cromatici.

Abbiamo già detto che studi e ricerche sono inoltre orientati verso l'identificazione e l'applicazione pratica di sostanze ad azione diversa, che attraggano ad esempio le femmine vergini al fine da evitare la fecondazione, o quelle fecondate, per evitare l'ovideposizione.

Vi sono inoltre ricerche finalizzate ad ottenere un'efficace azione multifunzionale, per attrarre in modo mirato e simultaneo più specie parassite; altre ricerche mirano a ottenere costanza di performance attrattiva nelle più diverse condizioni ambientali.

All'attrazione possono essere poi abbinati obiettivi diversi, ad esempio:

- la contaminazione con feromone per disorientare gli altri maschi
- la contaminazione con insetticida da trasferire alla femmina
- la contaminazione con insetticida e feromone da trasferire ad altri individui e/o depositare sulla vegetazione, generando così nuovi punti di attrazione e contaminazione (si vedano per esempio Armsworth et al., 2006 e le referenze ivi citate)

Il monitoraggio automatico di ciò che accade in campo può contribuire alla progettazione e ottimizzazione delle stazioni e del sistema di difesa nel suo complesso; un sistema di rilevazione *monitor and release* può fornire importanti informazioni riguardo a:

- la migliore architettura delle stazioni, l'adeguata disposizione dei diversi componenti (varchi d'ingresso e uscita, punti di attrazione, punti di contatto, ecc.); il posizionamento e l'orientamento della stazione nell'appezzamento; la migliore disposizione relativa fra le singole unità della rete di stazioni;
- la capacità attrattiva nel tempo e nelle diverse condizioni, la performance relativa di sostanze attrattive e sistemi di erogazione diversi; l'efficacia di attrattivi multifunzionali, che agiscano su più specie;
- la quantità di feromone, *pabulum*, insetticida o altro preparato trasferita all'insetto; la risposta dell'insetto al contatto con questi preparati;
- il comportamento dell'insetto nei pressi della stazione e al suo interno, le traiettorie d'arrivo e di frequentazione, i punti con i quali viene a contatto, l'effettiva contaminazione con il semiochimico e/o l'insetticida ecc.; la capacità dell'insetto di riprendere il volo;
- il variare della frequentazione al variare delle condizioni ambientali (T, RH, mm di pioggia,  $v$  del vento) o in presenza di elementi di disturbo (altri insetti della specie o di specie diverse, inerti, alterazioni e degrado nella stazione, ecc.).

PRODUZIONE AGRICOLA A BASSO IMPATTO AMBIENTALE, CONSULENZA  
FITOSANITARIA, ASSISTENZA TECNICA AI PRODUTTORI

L'organizzazione di reti di rilevamento dei parassiti di interesse agrario ci sembra sia una delle applicazioni del monitoraggio automatico fra le più interessanti e ricche di sfide.

Le reti di monitoraggio agroambientale sono oggi molto diffuse e molto usate; esse sono strumento di riferimento ormai irrinunciabile per l'attività

Ultima modifica: 09.09.2008

Deutsch Italiano

**Servizi**  
Home  
Allertamenti  
Circolari  
Frutta e Vite  
Manuali  
Dati meteo  
Colpo di fuoco  
Curve di accrescimento

**Organizzazione**  
**Il Centro di Consulenza**  
Il Centro di Consulenza per la fruttiviteicoltura, con oltre 5.500 Soci ordinari, 1.000 Soci corrispondenti e 2.300 utenti internet, è la più numerosa organizzazione di consulenza privata a livello mondiale, attiva nel settore frutti-vibolo.  
Il nostro obiettivo consiste nel: fornire una consulenza indipendente ed imparziale che consenta la produzione di mele ed uva con modalità economicamente sostenibile e rispettose dell'ambiente.

**Allertamenti**  
**04.09.2008: ricamatori**  
Burgraviato (Lagundo, , Postal, Tirol, Gargazzone, ...  
**12.08.2008: ricamatori**  
Burgraviato (Lagundo, , Postal, Tirol, Gargazzone, ...  
**12.08.2008: ricamatori**  
Burgraviato

**Il Centro di Consulenza**  
**Soci**  
Software di accesso »  
Registrazione  
www.fruttaevite.info  
www.colpo-di-fuoco.it

**Dati meteo - 09 settembre 2008**

Stazione	Distretto	Ora	T 2m	Piovosità
Renon	Terlano	11:00	18.7°	0.0 mm
Plaus 1	Naturno	11:00	19.8°	0.0 mm
St. Justina	Terlano	11:00	19.7°	0.0 mm

**Manifestazioni**  
Attualmente nessun dato disponibile

Fig. 3 Pagina web del Centro di Consulenza per la Fruttiviteicoltura dell'Alto Adige - <http://www.beratungsring.org/>

agricola, in particolare là dove più forti e meglio organizzate sono le strutture di assistenza tecnica ai produttori, e maggiore è l'adesione delle aziende a disciplinari per la produzione a basso impatto ambientale (agricoltura integrata, agricoltura biologica).

Dato che la gamma di fattori che condizionano la produzione agricola è ampia e varia, anche le tecniche e gli strumenti per l'attività diagnostica e la modellistica previsionale, elementi fondamentali del supporto tecnico, sono vari e diversificati.

E diversi sono gli strumenti in uso per l'automazione della rilevazione e la trasmissione dei dati – centraline agrometeorologiche automatiche, captaspo-re, ecc. – i cui dati, inseriti in modelli previsionali, consentono di stimare i fabbisogni irrigui, l'epidemiologia di fitopatie vegetali, l'emergenza delle erbe infestanti.

Sempre più frequente e ormai necessario è anche l'uso del web per la trasmissione delle informazioni più aggiornate e la divulgazione dei bollettini agronomici e di difesa alle aziende agricole, ai tecnici e a tutti gli operatori interessati (si veda per esempio <http://www.beratungsring.org/>).



AVVERSAITÀ	CENTRI DI INTERVENTO	S.A. E AUSILIARI	LIMITAZIONI D'USO E NOTE
Carpocapsa (Cydia pomonella)	<b>Soglie</b> - 2 adulti per trappola catturati in una o due settimane - Per la I e la II generazione in base alle Indicazioni dei Bollettini provinciali - 1% di forti iniziali di penetrazione (varifiche su almeno 100 fruttifera)  <b>Soglie non vincolanti per le aziende che applicano i metodi della Confusione o del Disorientamento sessuale.</b> Installare la Confusione o il Disorientamento sessuale all'inizio del volo.  <b>Consigli</b> - Nelle aziende che negli ultimi anni hanno subito forti danni di carpocapsa si sconsiglia l'uso degli IGR (1). - Nei casi di perdita di efficacia di uno o più p.a., si consiglia il prevalente impiego delle tecniche di confusione sessuale e del virus della granulosa. - In prima generazione si consiglia di utilizzare Virus della granulosa. - Si consiglia di non utilizzare il virus in miscela con altri prodotti attivi nei confronti della carpocapsa. - Per problemi di incompatibilità si consiglia di non utilizzare il virus in miscela con prodotti ramici. - Si consiglia di non utilizzare l'azinfos metile in prima generazione. - Al fine di prevenire l'insorgere di resistenze si consiglia di evitare l'impiego ripetuto degli stessi p.a. sulle diverse generazioni del filotago. - Al fine di limitare la consistenza delle popolazioni impiegare i nematodi entomopatogeni che vanno applicati sopraffocando sulla parte basale dei fusti, tra la metà settembre e la metà di ottobre in corrispondenza con precipitazioni o abbondanti irrigazioni, al momento dell'applicazione e per le ore successive occorre che la temperatura minima sia superiore ai 13° C.	Confusione e disorientamento sessuale Virus della granulosa Diflubenzuron (1) Teflubenzuron (1) Triflumuron (1) Metofenozide (1) Tefufenozide (1) Flufenossuron (1) (2) Spinosad (3) Etofenprox (4) (5) Thiacloprid (6)  Fosmet (7) (10) Malatoin (8) (10) Clorpirifos etile (9) (10)  Nematodi entomopatogeni	Installare almeno 2 trappole per azienda con le caratteristiche riportate nella tabella A, entro l'ultima decade di aprile o in base alle indicazioni dei Bollettini Provinciali  (1) Al massimo 4 Interventi all'anno indipendentemente dall'avversità (2) Al massimo 1 Intervento all'anno indipendentemente dall'avversità e solo entro la fine di maggio  (3) Al massimo 2 Interventi all'anno indipendentemente dall'avversità (4) Al massimo 1 Intervento all'anno indipendentemente dall'avversità (5) Se ne consiglia l'uso in pre-raccolta (6) Al massimo 1 Intervento all'anno indipendentemente dall'avversità Non ammesso contro la I generazione, solo nel caso in cui sulla coltura non siano impiegati altri insetticidi: - Impiegabile anche in I generazione - Impiegabile 2 volte all'anno - nella stessa annata non può comunque essere impiegato su 2 generazioni consecutive (7) Al massimo 4 Interventi all'anno indipendentemente dall'avversità (8) Al massimo 4 Interventi all'anno indipendentemente dall'avversità (9) Al massimo 4 Interventi all'anno indipendentemente dall'avversità (10) Tra Clorpirifos etile, Clorpirifos metile, Fosmet e Malatoin al massimo 6 interventi all'anno indipendentemente dall'avversità

Fig. 4 Norme di difesa dalla carpocapsa del melo – web page dei disciplinari di agricoltura integrata E. Romagna '08 ([http://www.ermesagricoltura.it/wcm/ermesagricoltura/consigli\\_tecnici/disciplinari/sezione\\_disciplinari.htm](http://www.ermesagricoltura.it/wcm/ermesagricoltura/consigli_tecnici/disciplinari/sezione_disciplinari.htm))

L'inserimento di strumenti automatici per il monitoraggio di parassiti nelle reti di rilevazione già esistenti potrebbe costituire un'innovazione tecnologica di entità rilevante.

Da sistemi di rilevazione in continuo, grazie alla minore variabilità nella frequenza rispetto alla rilevazione fatta dai tecnici con osservazioni di campo delle trappole, e grazie alla possibilità di monitorare contemporaneamente vaste porzioni di territorio, si potrebbero ottenere informazioni utili all'affinamento dei modelli previsionali e all'innovazione delle tecniche di difesa.

I dati, abbinati alle informazioni ottenute dalle stazioni agrometeorologiche, potrebbero essere riassunti in indicazioni agronomiche e fitosanitarie agli operatori agricoli sempre più precise, rapide e mirate.

L'adozione di sistemi automatici potrebbe sostenere lo sviluppo di reti di monitoraggio allargate che coprano ampie porzioni di territorio con sistemi armonizzati di rilevazione e di reporting. I dati rilevati contemporaneamente da più stazioni potrebbero essere affiancati a quelli delle stazioni agrometeorologiche, che sono aggiornati con frequenza plurigiornaliera sulle pagine web dei centri d'informazione e di assistenza.

Per colture di grande interesse per vasti comprensori del nostro territorio, si può immaginare la previsione contemporanea del rischio d'infezione e del rischio d'infestazione mediante la rilevazione automatica "abbinata" dei dati meteorologici e della fenologia dei parassiti (*es. peronospora e oidio + tignola e tignoletta della vite; ticchiolatura e oidio + carpocapsa e ricamatori del melo*).

Una rete di monitoraggio efficiente e un sistema di comunicazione rapido potrebbero dare nuovo impulso allo sviluppo di sistemi mirati di contenimento dei parassiti come la confusione sessuale: il successo della tecnica richiede la messa in opera su grandi superfici (massimo rapporto superficie-perimetro)

al fine di minimizzare l'effetto-bordo e quindi l'impatto di fattori esogeni; la sua efficacia inoltre deve essere tenuta sotto costante controllo.

Ancora, l'adozione dei medesimi sistemi su superfici più piccole può aiutare lo sviluppo di protocolli di difesa a maggiore precisione fitoiatrica e magari meno intensivi in produzioni ad elevato input di insetticidi, in ambienti circoscritti e controllati: nel settore ortoflorovivaistico ad esempio interventi fitoiatrici più mirati potrebbero consentire una riduzione dei trattamenti e dei carichi, anche allo scopo di ottenere una minore esposizione complessiva degli operatori, spesso molto alta specie in colture protette.

#### MONITORAGGIO ESTENSIVO DEI SISTEMI AGROFORESTALI, DEI PARCHI E DEL VERDE PUBBLICO

Il monitoraggio dei sistemi agroforestali può avere la duplice finalità di approfondire studi di ecologia delle foreste e di tenere sotto controllo il loro stato fitosanitario.

Si tratta normalmente di monitoraggi fatti su base estensiva, che mirano innanzitutto all'identificazione delle avversità, della loro biologia e della loro diffusione, e quindi alla definizione di strategie per il contenimento del danno che tali avversità potrebbero determinare.

Anche in questo caso una rete di monitoraggio adeguatamente progettata sulla base dei tipi e delle categorie forestali, della loro distribuzione territoriale e delle specifiche problematiche fitosanitarie potrebbe costituire un utile strumento di controllo centralizzato delle presenza e delle dinamiche di popolazioni parassite in territori molto vasti e spesso difficilmente accessibili. Esso fornirebbe informazioni puntuali sugli eventi, la loro precisa dinamica *in situ*, la loro collocazione temporale, e le condizioni in cui sono accaduti.

L'osservazione continua del comportamento di specie significative potrebbe ad esempio fornire informazioni precise su variazioni della biologia e della fenologia dei parassiti, come le variazioni del ciclo biologico di *Thaumetopoea pityocampa* Schiff., che è stata messa di recente in evidenza in foreste del Portogallo: le larve fitofaghe si sviluppano in estate anziché in inverno e sono meno suscettibili all'attacco dei parassitoidi (Santos et al., 2008).

Altri studi hanno evidenziato l'ampliamento verso nord e verso sud dell'areale di colonizzazione di lepidotteri parassiti di specie arboree forestali (Battisti, 2008).

Queste variazioni, se immediatamente e puntualmente rilevate, potreb-

bero essere messe in più precisa relazione con i dati meteorologici, e questo potrebbe aiutare a capirne le cause e a modellarne meglio l'evoluzione.

Ancora, potrebbero essere tenute sotto costante monitoraggio specie a rischio, inserite in programmi di studio e tutela della biodiversità.

Gli obiettivi stessi del monitoraggio indicheranno la scelta più opportuna fra le tecniche *attract*, *monitor and release* e *kill and monitor* già descritte.

Nell'ambito del verde urbano forestale e ornamentale, sistemi di monitoraggio automatico potrebbero essere utili a tenere sotto costante controllo la presenza di parassiti vegetali che minacciano la stabilità degli alberi (*Cossus cossus* L.), oppure quella di specie soggette a lotta obbligatoria per ragioni fitosanitarie o perché agenti di allergopatie (*T. pityocampa*).

Va tenuto presente in questo specifico caso che i parchi urbani e peri-urbani, alcuni dei quali con dimensioni di centinaia di Ha, devono avere linee di difesa mirate che siano senz'altro efficaci, anche a tutela del valore estetico-paesaggistico dei parchi stessi, ma con minimo impatto ambientale e minima esposizione di tutti gli organismi non-target e questo sia per il valore ecologico-educativo insito nel concetto stesso di parco sia per il mantenimento di una costante fruibilità del bene-parco da parte dei cittadini.

#### MONITORAGGIO E CONTROLLO DI PARASSITI DA QUARANTENA

La continua intensificazione delle comunicazioni e degli scambi fra le diverse parti del mondo rende sempre più alto il rischio che specie parassite esogene entrino nel nostro paese.

Un'analisi del rischio basata su standard internazionali (ISPM2 – FAO, 1996 e ISPM 11 – FAO 2003) consente di assegnare lo status di parassita da quarantena alle specie che risultino in grado di entrare nella zona di riferimento e insediarsi con un inaccettabile impatto economico, ambientale, sociale (Baker et al., 1999).

Negli anni recenti si sono molto intensificati gli sforzi per assicurare sempre maggior protezione dall'introduzione di specie esogene invasive (*IAS* = *invasive alien species*) ma vi sono tuttora casi di invasione anche molto gravi.

Citiamo come importanti esempi riguardanti l'Italia tre specie di coleotteri, la *Diabrotica virgifera virgifera* Le Conte, crisomelide parassita del mais, l'*Anoplophora chinensis* Forster, cerambicide polifago che attacca numerose specie arboree ornamentali e da frutto, e il *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier, il punteruolo rosso delle palme; ancora possiamo citare un imenottero, il *Dryocosmus*

*kuriphilus* Yasamatsu o vespa cinese del castagno, che attacca appunto le piante di castagno europeo e si sta diffondendo nelle foreste dell'Appennino.

Avversità esogene come queste richiedono reti di monitoraggio efficienti e flessibili, attorno alle aree di possibile ingresso, a quelle focolaio e a quelle a rischio. L'eradicazione di tali avversità prima che esse siano causa di danni irrimediabili è legata anche alla rapidità e alla precisione degli interventi.

L'identificazione di specie invasive a rischio elevato può suggerire l'adozione di reti di monitoraggio attorno ai punti di più probabile ingresso, ad esempio i grandi porti e aeroporti.

Benché valutato come spesso accade "con il senno di poi", il caso della *D. virgifera virgifera* può forse dare qualche suggerimento alla progettazione delle reti.

Trovato per la prima volta in Europa nel 1992 nei pressi dell'aeroporto di Belgrado (EPPO, 2004), l'insetto ha colonizzato negli anni diversi areali e sono stati evidenziati 2 meccanismi di diffusione: la specie si è diffusa naturalmente nella zona dei Carpazi allargando la propria area di presenza con un progressione a cerchi concentrici, il cui raggio è aumentato di circa 80 km all'anno. Essa inoltre è stata successivamente catturata nei pressi di diversi aeroporti in Italia, Francia, Belgio, Inghilterra, Svizzera, e questo indica chiaramente un collegamento fra la sua diffusione e il trasporto aereo.

Se da un lato i trasferimenti tramite un vettore, ad esempio un aereo, possono essere ben identificati mediante l'analisi delle attività di scambio, assai più complessa è la modellizzazione della dispersione naturale (Cain et al., 2003).

Gli strumenti di rilevazione automatica possono in questo caso essere d'aiuto non solo alla rilevazione dell'insetto intorno ai punti di possibile ingresso, ma anche alla comprensione delle sua biologia nei nostri ambienti (n° di generazioni, periodo di sfarfallamento, curve di ovideposizione, ecc.), dei percorsi e dei tempi di diffusione sul territorio.

Abbiamo più volte ripetuto che la rilevazione deve essere preceduta dall'attrazione, e questo dev'essere ulteriore elemento d'indagine: facendo riferimento alle specie esogene citate poco sopra, sono oggi disponibili attrattivi per *D. Virgifera virgifera* e *R. ferrugineus*, ma non ve ne sono di efficaci per *A. chinensis* e *D. kuriphilus*.

#### LE SFIDE INDUSTRIALI DIETRO L'IDEA E ALCUNE CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Oltre alla verifica dei benefici e dei limiti dal punto di vista agronomico e fitoiatrico, la messa in opera di strumenti e reti per il monitoraggio automatico

degli insetti presenta senza dubbio altre necessità, vere sfide dal punto di vista progettuale.

L'identificazione di queste necessità è in questo momento assai complessa perché la tecnica è ancora in una fase piuttosto precoce del suo sviluppo, e il suo utilizzo ha una casistica sperimentale ancora limitata.

Abbiamo identificato alcune fra le caratteristiche più importanti che i sistemi dovrebbero avere:

- gli strumenti devono essere compatti, facilmente trasportabili e installabili, e devono poter essere messi in opera da personale competente ma senza richiedere conoscenze troppo specialistiche. Questo garantirebbe ai tecnici dei servizi di monitoraggio la possibilità di spostarli facilmente e predisporne i parametri di utilizzo secondo necessità.  
In opera essi non devono ostacolare l'attività in campo di operatori e macchine agricole.
- l'architettura degli strumenti e le tecniche di rilevazione dell'immagine non devono determinare modifiche nel comportamento degli insetti, che altererebbero il normale funzionamento della stazione di attrazione e impedirebbero la corretta interpretazione di ciò che avviene in “normali condizioni di campo”;
- risoluzione dell'immagine rilevata e ampiezza del campo di osservazione determinano naturalmente il tipo di informazioni che lo strumento è in grado di fornire; lo strumento deve poter garantire il riconoscimento della specie sulla base di parametri morfologici e biometrici certi e questa esigenza è tanto più importante quanto più si è in grado di mettere in opera tecniche di attrazione multifunzionali, che consentano il monitoraggio contemporaneo di più specie;
- una possibile diffusione dello strumento su ampia scala e l'uso delle informazioni per la redazione di comunicazioni e bollettini tecnici richiede anche l'adozione di adeguati standard informatici, l'armonizzazione dei protocolli internet, la definizione di regole comuni per l'archiviazione dei dati e la loro consultazione, ecc.;
- la disponibilità di semiochimici multifunzionali, che consentano di attrarre più specie fra quelle che si vogliono rilevare, conferirebbe agli strumenti di rilevazione automatica un'elevatissima utilità pratica, consentendo di ampliare il campo d'indagine di ogni singola unità. Presupposto necessario ad un buon uso dello strumento è, come già detto, che capacità di risoluzione delle immagini e software di elaborazione garantiscano univocità di riconoscimento almeno pari a quella dei rilievi visivi.

Il progetto di sviluppare sistemi per la rilevazione automatica in campo di insetti parassiti è ambizioso e possibile: per quanto piccola sia ancora la casistica sperimentale di cui si dispone, i primi strumenti hanno dato risposte confortanti alle esigenze di monitoraggio per cui sono stati progettati.

Queste risposte confermano che esistono sia le conoscenze scientifiche e tecniche sia le tecnologie per poter sviluppare strumenti adatti all'uso corrente. Siamo all'inizio della strada.

Ma volendo comunque fare sin da ora un salto "un po' più in là", si potrebbe già pensare allo sviluppo di tecniche e strumenti per studiare a fini anche pratici non solo gli individui ma anche le loro aggregazioni e i modelli che le caratterizzano.

Molti studiosi si occupano da tempo delle dinamiche di gruppo e della relazione fra individui negli stormi d'uccelli (si veda come esempio Parisi et al., 2008) o nei branchi di pesci: poter applicare alle ricerche sulle api strumenti ottici di rilevazione che operino in condizioni di campo potrebbe forse aiutare a capire meglio le ragioni della loro progressiva diminuzione...

#### RIASSUNTO

Uno strumento di monitoraggio automatico che rilevi con continuità e in normali condizioni di campo la presenza, le dinamiche di popolazione e il comportamento degli insetti offre numerose possibilità di applicazione, nella ricerca entomologica e nello sviluppo di tecniche fitoiatriche mirate.

Abbiamo identificato i possibili campi di applicazione della tecnologia, gli scopi che il suo uso potrebbe avere e i vantaggi che ne deriverebbero. Reti di monitoraggio territoriale potrebbero essere usate per programmare gli interventi fitosanitari nei grandi comprensori viticoli, frutticoli e ortofloricoli, e per tenerne sotto costante controllo l'efficacia. Esse sarebbero inoltre utili alla tutela del patrimonio agroforestale e al controllo della diffusione dei parassiti da quarantena.

Abbiamo anche cercato di connotare le caratteristiche indispensabili degli strumenti e le sfide progettuali da affrontare.

#### ABSTRACT

An automatic monitoring tool for in-field continuous assessment of the presence, the behaviour and the population dynamics of ag and forestry pests has a wide range of potential applications in entomology research and in the development of new techniques of "precision pest control".

We identified the potential applications of the technology, the purposes of its use and the predicted advantages.

Nets of monitoring tools can be used to program phytosanitary strategies in vine, top fruit and veggies/flowers, and to maintain efficacy of them under continuous control. These nets would also be suitable for the protection of forests and for the control of the dispersal of quarantine species.

We also tried to identify the key features of the tools and the challenges ahead to obtain a friendly and helpful technology.

# BIBLIOGRAFIA

- ARMSWORTH C., BAXTER I., BARTON L., POPPY G., NANSEN C. (2006): *Effects of adhesive powders on the mating and flight behavior of mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae)*, «Journal of economic entomology», vol. 99, n. 4, pp. 1194-1202.
- BAKER R.H.A., MACLEOD A., SANSFORD C.E. (1999): *Pest Risk Analysis: the UK experience*, Proc. ANPP 5<sup>th</sup>, Int.l Conference on Pests in Agriculture, Montpellier (F) December 1999.
- BATTISTI A. (2008): *Population structure and range expansion of the pine processionary moth Thaumetopoea wilkinsoni*, Proc. of Entomological Research in Mediterranean Forestry–Med Insect 2008, Estoril (P) May 2008.
- CAIN M.L., NATHAN R., LEVIN S.A. (2003): *Long distance dispersal*, «Ecology», vol. 84, pp. 1943-1944.
- EPPO (2004): *Diabrotica virgifera*, [http://www.eppo.org/QUARANTINE/Diabrotica\\_virgifera/diabrotica\\_virgifera/html](http://www.eppo.org/QUARANTINE/Diabrotica_virgifera/diabrotica_virgifera/html).
- FAO (1996): *Guidelines for pest risk analysis*, «International Standards for Phytosanitary Measures», no. 2, Rome - Food & Agriculture Org.n of UN.
- FAO (2003): *Pest risk analysis for quarantine pests including analysis of environmental risks*, «International Standards for Phytosanitary Measures», no. 11, Rev. 1, Rome - Food & Agriculture Org.n of UN.
- OBERTI R., NALDI E., BODRIA L. (2008): *Automatic remote monitoring of attractant-based insecticide delivering systems*, Proc. of AgEng 2008, Paper OP-1800, Ed. AgEng, International Conference on Agricultural Engineering, Crete June 2008.
- PARISI G. (2008): *Il volo degli storni sopra Roma: un'analisi quantitativa del movimento di gruppo degli animali*, Conference at Accademia dei Lincei, Rome, Jan 2008.
- SANTOS H., PAIVA M.R., KERDELHUÉ C., BRANCO M. (2008): *Ecological and genetic divergence between two Thaumetopoea pityocampa populations with different phenology*, Proc.of Entomological Research in Mediterranean Forestry –Med Insect 2008, Estoril (P) May 2008.