# Utilització de feromones d'insectes en un control integrat de plagues

**Ángel Guerrero**

Departament de Química Biològica i Modelització Molecular,
Institut de Química Avançada de Catalunya, CSIC

*USE OF INSECT PHEROMONES IN INTEGRATED PEST MANAGEMENT. – Pheromones are chemical signals emitted by one organism that induce a response in another individual of the same species. These chemicals have many different effects and are named according to the elicited response. Sex pheromones are produced by virgin females to attract the opposite sex for mating, with males flying along the pheromone gradient towards the female. Aggregation pheromones are generally produced by males and result in the arrival of both sexes at the calling site. Other types of pheromones comprise alarm pheromones, which are produced by insects under attack from a predator; marking pheromones, used by parasitic insects to mark hosts in which they have laid eggs, etc. The use of pheromones has a number of potential advantages derived from their main feature of being naturally occurring. They are non-toxic and do not pollute the environment. They are insect-specific and their safety characteristics and activities make them ideal components of integrated pest management (IPM) systems. In this paper, I present an overview of some pheromones of economically important pests and their utilization as a biorational control method. In addition, the development of pheromone antagonists as a new approach to pest control is also outlined.*

## Introducció

Malgrat els notables desavantatges que presenten els insecticides convencionals, és a dir, poca o nul·la especificitat, eficàcia limitada, inducció a la resistència i contaminació ambiental, la producció anual de pesticides sintètics ha anat en increment sense parar des de l'any 1945 fins a l'actualitat. Així, el 1990 es van aplicar als Estats Units unes 225.000 tones de pesticides sintètics, una quantitat 35 vegades superior a la utilitzada al 1945, mentre que a la Unió Europea el 1998 se n'utilitzaren unes 325.000 tones. Tot i així, les pèrdues ocasionades per plagues d'insectes, malalties i males herbes es van incrementar des del 31% al 1945 fins al 37% al 1990 (Hilman, 1990). A això cal afegir que, cada any es produeixen uns 3 milions d'intoxicacions, de les quals unes 220.000 són mortals (WHO, 1999). Per altra banda, es creu que al voltant de 500 espècies d'insectes i àcars i 100 espècies de fongs han creat resistència a causa de la utilització indiscriminada de pesticides. Aquests fets van fer palesa la necessitat ineludible de desenvolupar alternatives noves a la utilització indiscriminada de pesticides, més específiques i menys contaminants per al control de plagues. Aquestes alternatives inclouen entre altres la manipulació genètica d'insectes perjudicials, la utilització d'enemics naturals (control biològic), la selecció de varietats resistents a les plagues, i, sobretot, la utilització dels anomenats insecticides bioracionals, una nova generació de compostos químics capaços d'interferir en els processos de comunicació inter o intraespecífica dels insectes. Els agents bioracionals poden ser microorganismes (bacteris, virus, protozous, fongs i nematodes), productes naturals o compostos químics de síntesi. Entre tots aquests agents cal destacar els compostos semioquímics (veugeu més avall), els reguladors naturals de plantes com l'azadiractina i els reguladors de creixement d'insectes, entre altres.

Els senyals químics foren el primer tipus de comunicació que es desenvolupà sobre la Terra. Tot i que quan parlem de comunicació ens referim en general a termes de visió o so, per a molts organismes l'enviament i recepció de senyals químics constitueix el mètode primari de comunicació. Aquests senyals químics poden ser combinats en multitud de formes per a crear molts missatges diferents. Així, de la mateixa manera que molts humans utilitzem un alfabet d'unes 25-30 lletres per a construir milers de paraules, es poden generar un gran nombre de senyals químics si es combinen un nombre petit de compostos senzills. Els senyals químics (semioquímics, del grec *semeon*: senyal, marca) que es fan servir per a la comunicació entre membres de la mateixa espècie es coneixen amb el nom de feromones. Quan s'utilitzen per a la comunicació entre membres d'espècies diferents es coneixen com aleloquímics (Headrick i Gordh, 2001), si el senyal beneficia l'emissor reben el nom d'alomones (del grec *allos* i *homon*: excitar a altres), si beneficia el receptor cairomones (del grec *kairos*: oportú), mentre que si produeixen reaccions beneficioses tant per l'emissor com pel receptor s'anomenen synomones (del grec *syn*: junt a).



Figura 1. El paó de nit petit *Saturnia pavonia* va ser la primera espècie en què es va demostrar que els mascles eren atrets per les femelles des de diversos quilòmetres de distància.

El concepte feromona va ser introduït per Karlson i Luscher (1959) i la seva etimologia ve de les paraules gregues *pherein* (transportar) i *hormon* (excitar). El naturalista francès J.H. Fabre al 1870 va ser el primer de demostrar que els mascles del paó de nit petit o papallona de Sant Antoni (*Saturnia pavonia*) (fig. 1) eren atrets per les femelles des de diversos quilòmetres de distància. No obstant això, la identificació de l'estructura de la primera feromona va haver d'esperar fins a 1959, quan Butenandt (fig. 2), després de 25 anys de treball, va culminar amb l'elucidació estructural de la feromona sexual de la papallona de la seda (*Bombyx mori*). Van ser necessaris al voltant d'un milió de capolls, que podrien haver produït uns 90 kg de seda, per a aconseguir 6,4 mg d'un material actiu que després del seu aïllament i identificació es denominà bombicol ((*E,Z*)-10,12-hexadecadienol) (fig. 3). El compost va induir els mascles a copular a concentracions molt baixes (solucions orgàniques de $1\times10^{-12}$ $\mu$g/mL van ser actives), i aquest fet va conduir els investigadors a prosseguir els estudis sobre altres insectes davant la possibilitat d'utilitzar les feromones com a una nova alternativa per al control de plagues. Per aquesta raó, el desenvolupament de tècniques analítiques i espectroscòpiques per a la recol-

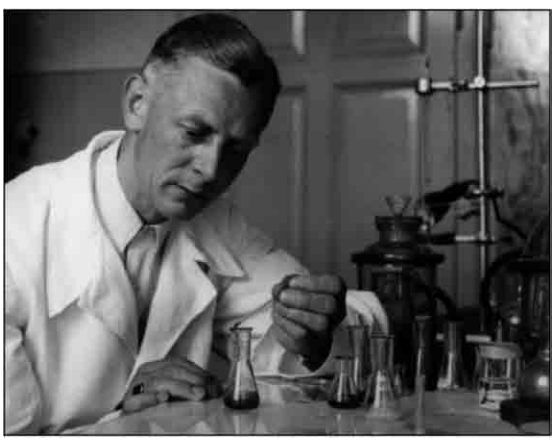


Figura 2. Adolf Butenandt al seu laboratori (Archiv zur Geschichte des Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem).

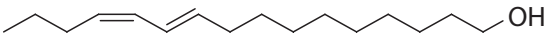



Figura 3. Estructura del bombicol, primera feromona identificada en insectes.

lecció, anàlisi i bioassaig de feromones i altres compostos biològicament actius ha accelerat notablement la identificació d'aquests senyals químics (Millar i Haynes, 1998).

En alguns casos, ha estat possible identificar un complex feromonal amb menys de 10 individus, però, això és una excepció a causa de les quantitats ínfimes (generalment de l'ordre de nanograms, $10^{-9}$ g) de feromona que produeixen les femelles. Actualment es coneixen alguns centenars de feromones d'insectes així com d'altres organismes superiors (El-Sayed, 2008). Estudis de laboratori han demostrat que la concentració de feromona a l'aire requerida per induir al mascle la recerca de la femella és de l'ordre de $10^{-18}$ g/cm$^3$, és a dir que són suficients uns milers de molècules per produir una resposta sensorial dels mascles (Shani, 2000).

## Estructura i especificitat

La majoria de feromones emeses per femelles són hidrocarburs insaturats de cadena lineal llarga amb una funció terminal oxigenada de tipus aldehid, alcohol o sobretot acetat, tot i que també es coneixen compostos cíclics de tipus ciclobutà, cetones, hidrocarburs ramificats i epòxids (fig. 4).

El nombre d'àtoms de carboni oscil·la generalment entre 10 i 21, la geometria dels dobles enllaços és generalment *cis* (*Z*) i estan distribuïts entre les posicions 1 i 20 i són la 9 i la 11 les més freqüents (Ando *et al*., 2004). En general, les feromones són de tipus multicomponent (complex feromonal) i rarament es descriuen feromones amb un sol component. Aquest és el cas, no obstant això, de la processionària del pi (*Thaumetopoea pityocampa*) (fig. 5), de la qual només es coneix l'acetat de (*Z*)-13-hexadecen-11-inil com a únic component emès per les femelles (fig. 4). El nombre, posició i geometria dels dobles enllaços són paràmetres importants per a l'activitat. Per exemple, la importància de la posició queda palesa amb les respostes de diferents races de l'arna *Ctenopseustis obliquana*. El component principal de la feromona d'una de les races és l'acetat de (*Z*)-8-tetradecenil (fig. 4), mentre que l'altra raça respon únicament a l'acetat de (*Z*)-5-tetradecenil. L'adició de quantitats petites de l'anàleg a (*Z*)-8 va reduir les respostes dels mascles de la raça "(*Z*)-5-" a la seva pròpia feromona.

L'especificitat de les feromones és una de les seves principals característiques. En general, si una feromona és un únic enantiòmer, l'altre enantiòmer és generalment inactiu; aquest és el cas de la formiga faraó (*Monomorium*

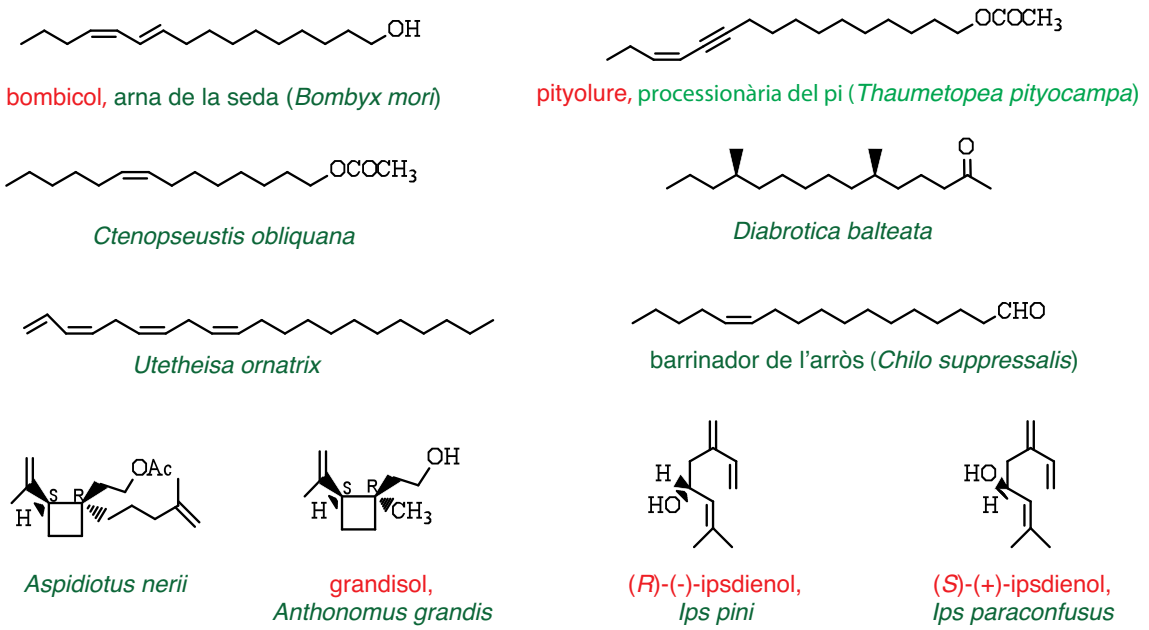



Figura 4. Diversitat estructural de feromones d'insectes. En vermell s'indica el nom de l'hormona, en verd el de l'insecte que la produeix.

*pharaonis*) en la qual l'únic enantiòmer actiu té la configuració *3S,4R*. En altres casos, només un enantiòmer pot ser actiu però l'enantiòmer oposat pot inhibir l'acció de la feromona i també diferents enantiòmers poden ser utilitzats per diferents espècies del mateix gènere. Això passa amb (*S*)-(+)-ipsdienol, la feromona del coleòpter de l'escorça *Ips paraconfusus*, mentre que el seu enantiòmer, (*R*)-(+)-ipsdienol, ho és d'altres espècies congèneres tals com *Ips calligraphus, I. pini* i *I. avulsus*. Cal assenyalar que (*S*)-(+)-ipsdienol inhibeix l'atracció d'*I. pini*, mentre que l'enantiòmer *R* inhibeix la d'*I. paraconfusus*.

## Bioassaigs

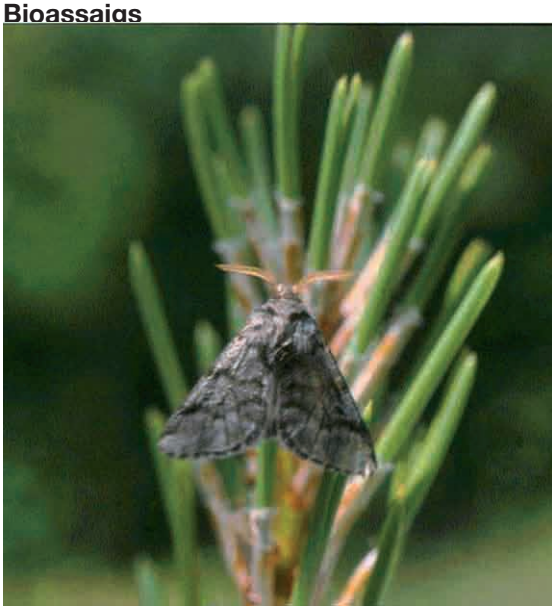


Figura 5. Mascle de la processionària del pi (*Thaumetopoea pityocampa*).

El desenvolupament d'un bioassaig efectiu requereix d'un coneixement bo del comportament de l'espècie en qüestió. No obstant això, l'anàlisi d'aquest pot ser extremadament complex i a més pot estar afectat amb freqüència per variacions dels paràmetres ambientals, com poden ser la temperatura i la humitat. Els bioassaigs per a determinar l'activitat dels senyals químics volàtils poden agrupar-se en dues classes: els que utilitzen aire en moviment i els que no (Baker i Cardé, 1984). En els bioassaigs que no requereixen corrents d'aire el compost químic s'evapora des d'un dispensador, i s'estableix així un gradient decreixent de concentració per simple difusió. L'equipament necessari és molt simple i poden ser suficients unes càpsules de Petri o caixes petites d'experimentació. Molt més complexos, però a l'hora més eficients, són els bioassaigs que utilitzen aire en moviment per produir un corrent controlat d'aire uniforme tant en potència com en direcció. En aquests assaigs el compost químic és transportat a contracorrent en una "ploma" odorífera i les respostes de comportament de l'insecte són registrades quan entra o s'aparta de la "ploma". Els dos tipus de bioassaigs més comuns d'aquesta classe són l'olfactòmetre i el túnel de vent. L'olfactòmetre (fig. 6) es pot construir amb un o més braços, cada un d'ells amb una font separada d'olor, mentre que el túnel de vent (fig. 7) té sempre una sola font d'aire, tot i que el corrent aeri pot contenir múltiples emissors amb diferents compostos a assajar (Knols *et al.*, 1994).

En els dos tipus d'assaigs el test és de tipus comparatiu. En un olfactòmetre de doble elecció, per exemple, l'anàlisi més simple

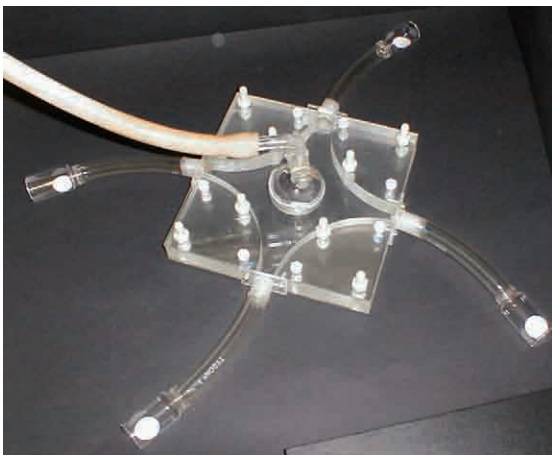


Figura 6. Olfactòmetre de doble elecció utilitzat per a l'avaluació de l'activitat atraient de la feromona del corc del boniato *Cylas formicarius elegantulus* (Sureda *et al.,* 2006).

ha de comparar el nombre de vegades que l'insecte prefereix seguir sobre el braç que conté el semioquímic davant de quan ho fa sobre el braç control, i tot això enfront de la hipòtesi nul·la que s'ha de testar, que implica que qualsevol dels dos braços són igualment elegibles (percentatge de probabilitat 50:50). Al túnel de vent una anàlisi simple seria determinar un moviment més gran o més ràpid de l'insecte quan el producte a assajar s'allibera al corrent d'aire o quan no. Tots els olfactòmetres i túnels de vent es dissenyen tenint en compte tant la mida com el comportament esperat de l'insecte i no estan disponibles de forma comercial.

**Tècniques electrofisiològiques**

Les tècniques electrofisiològiques, com l'electroantenograma (EAG) i el registre de sensília única (*single sensillum recording*, SSR), han esdevingut molt útils per a la identificació i avaluació del paper fisiològic i del comportament dels semioquímics en els insectes (Roelofs, 1984). L'EAG fou inicialment desenvolupat per Schneider al 1957 per mesurar la resposta de les antenes dels mascles de *Bombyx mori* davant de compostos volàtils extrets de la glàndula feromonal de les femelles (Schneider, 1957). L'EAG és, en essència, la suma dels potencials d'acció dels receptors olfactius que es registren entre la base i l'extrem distal d'una antena quan aquesta és estimulada per un compost volàtil (Guerrero *et al*., 1986). L'antena del mascle se suspèn entre dos elèctrodes connectats a un amplificador de voltatge, que al mateix temps es connecta a un oscil·loscopi o a la pantalla d'un ordinador. Quan l'antena s'excita amb un "puff" de feromona s'estableix una deflecció negativa aguda del voltatge, al voltant de 1-2 mV, seguida d'un retorn lent del senyal a la línia de base després d'uns segons. L'EAG indica, per tant, que un compost específic estimula certes cèl·lules receptores, però no dóna informació sobre la resposta del comportament de l'insecte davant la presència del compost. Per exemple, el (*Z*)-11-hexadecenol, que va ser identificat als extractes glandulars de les femelles de l'arna del blat de moro (*Helicoverpa zea*), induïa despolaritzacions notables a l'EAG, però al camp va resultar ser un inhibidor potent de la feromona. Encara més, compostos actius a l'EAG sobre la mosca tse-tse (*Glossina morsitans*) poden tenir un efecte repel·lent (com l'acetofenona i el 2-metoxifenol), atraient (com l'1-octen-3-ol, 4-metilfenol i 3-propilfenol) o nul quant a l'activitat en comportament (com 2,6,10,10-tetrametil-1-oxaspirol[4,5]dec-2-en-8-ona) (Bursell *et al*., 1788). La sensibilitat notable de l'EAG ha estat fins i tot millorada, en especial en aquells casos amb una relació senyal/soroll pobre, amb la connexió en sèrie de diverses antenes (fins a 4) (Park i Baker, 2002).

L'acoblament de l'EAG amb un cromatògraf de gasos incrementa de forma substancial el poder de l'EAG atès que utilitza l'efluent de la columna cromatogràfica com un segon detector. El sistema s'anomena de detecció

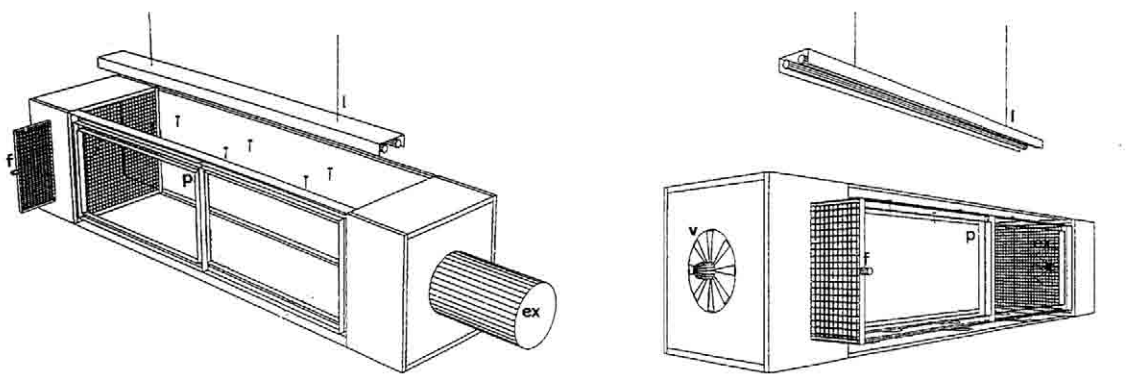



Figura 7. Representació esquemàtica d'un túnel de vent. v: ventilador; f: reixa amb filtre de cotó o llana de vidre; f: portes lliscants; i: il·luminació; ex: extractor per a l'evacuació de vapors.

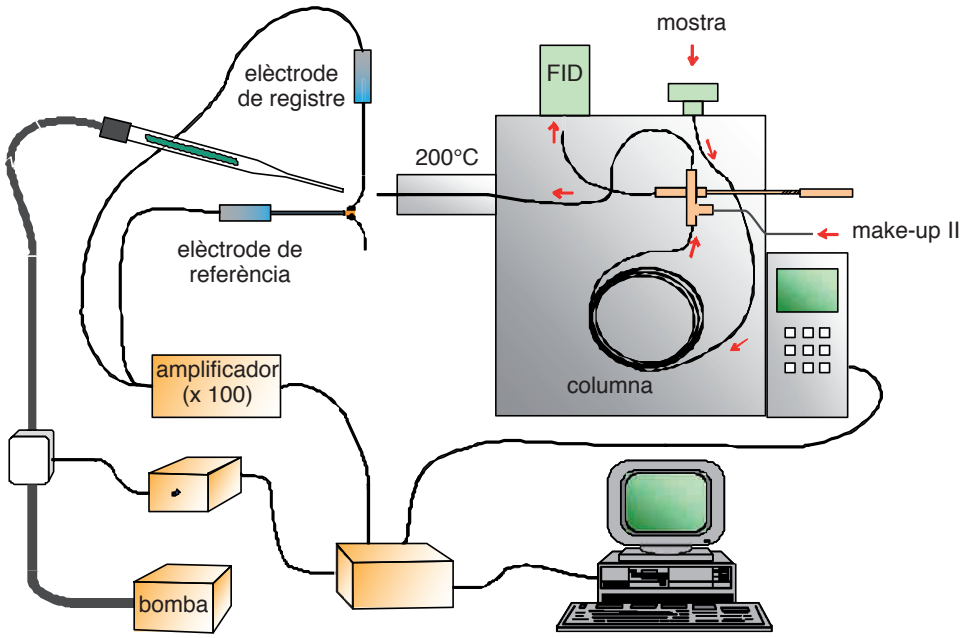



*Figura 8. Acoblament d'un cromatògraf de gasos i un electroantenograma (CG-EAD).*

electroantenogràfica o EAD (fig. 8) i en aquest cas l'antena respon a cada un dels compostos que emanen de la columna cromatogràfica, inclosos aquells separats per uns 2 o 3 segons (Malo *et al.*, 2000). Això és particularment útil per als isòmers que sovint se separen poc en el cromatògraf. Per exemple, els estereoisòmers de la supellapirona, la feromona sexual de la panerola *Supella longipalpa*, van ser resolts amb una columna quiral de cromatografia de gasos, i les respostes simultànies a l'EAG van establir que la configuració de la feromona era *2'R,4'R* (Leal *et al.*, 1995). S'ha desenvolupat, també, un sistema portàtil de l'EAG per tal de mesurar concentracions de feromones en camps infestats i en particular per ser utilitzats en experiments de confusió (Rumbo *et al.*, 1995).

Els registres de sensília única (SSR) són molt més selectius i corresponen a respostes de cèl·lules receptores individuals de l'antena de l'insecte així com a respostes de neurones dintre del lòbul antenal del cervell (Bäckman *et al.*, 2000). Les cèl·lules que responen als components de les feromones contenen macromolècules enllaçants específiques per a les molècules de feromona. Aquestes neurones específiques de feromones només estan presents al cervell. Per això, es pot dir que només els mascles responen a les feromones sexuals per la presència de receptors sexuals específics a l'antena així com a la de neurones al cervell. La tècnica pot ser particularment important quan compostos actius pel que fa al comportament no indueixen respostes intenses a l'EAG. Per exemple, registres de 545 cèl·lules van mostrar que la feromona d'agregació del barrinador de l'om (*Scolytus scolytus*) inclou (-)-α-cubebeno, un compost hoste que va ser detectat pel SSR però no per l'EAG (Wadhams, 1990).

De manera anàloga a l'EAG, la tècnica del SSR pot ser acoblada a un cromatògraf de gasos (CG) en el qual l'efluent es divideix en dos braços d'igual longitud, un porta el detector cromatogràfic (FID) i l'altre fa de línia de transferència a la cèl·lula olfactiva, de manera que els components que emanen de la columna són detectats de forma simultània pel FID i la cèl·lula olfactiva de l'insecte (Wadhams, 1984). La detecció per CG-SSR és en general més eficient que per CG-EAD, i així el CG-SSR va identificar 30 compostos als extractes volàtils de plantes sobre el curculiònid *Hylobius abietis*, mentre que només 16 van donar respostes detectables pel CG-EAD (Wibe, 2004). El consum més elevat de temps i esforç que implica la tècnica CG-SSR enfront de la del CG-EAD compensa pels resultats més fiables que s'obtenen amb la primera.

## Aplicacions pràctiques dels semioquímics

Els compostos semioquímics, com s'ha comentat anteriorment, estan considerats molt més segurs des d'un punt de vista ambiental que els pesticides convencionals ja que són compostos naturals, específics per a la plaga que es vol tractar, presenten una toxicitat molt baixa vers als vertebrats i són normalment volàtils que no deixen residus tòxics. Per això, els compostos semioquímics s'han utilitzat per detectar poblacions d'insectes (*monitoring*) i en estratègies per reduir-les mitjançant trampeig

massiu (*mass trapping*), amb sistemes d'atreure i matar (*lure-and-kill*) o produint confusió del comportament (*mating disruption*).

**Detecció**

El desenvolupament de sistemes efectius de detecció proporciona informació valuosa per a la coordinació de la periodicitat dels tractaments amb la fenologia de la plaga. Els semioquímics es fan servir en trampes per detectar canvis en els nivells de la població, el que permet un coneixement millor sobre l'inici de l'emergència dels adults i el seu màxim de vol. Els atraients més utilitzats en sistemes de detecció són les feromones sexuals per detectar lepidòpters (Cork *et al*., 2005; Wang *et al*., 2005), feromones d'agregació per als coleòpters (Allison *et al*., 2003; Adachi *et al*., 2007) i compostos odorífers de les plantes hostes per als dípters (Papadopoulos *et al*., 2001).

Per aconseguir una bona predicció de les pèrdues causades per les larves de la següent generació s'han de considerar diversos paràmetres: la composició de la feromona de la trampa, que inclou la seva dosi i puresa tant química com estereomèrica, i el color, tipus i posició de les trampes. La importància de la puresa estereomèrica queda palesa en estudis sobre les captures de la processionària del roure (*Thaumetopoea processionea*) (Breuer *et al*., 2003), la cotxinilla del pi (*Matsucoccus josephi*) (Dunkelblum *et al*., 2000) i el perforador de fulla *Phyllonorycter blancardella* (El-Sayed *et al*., 2005). El color de la trampa pot tenir importància en la detecció de xinxes (Adachi *et al*., 2007) o lepidòpters com la processionària del pi (*Thaumetopoea pityocampa*) (Athanassiou *et al*., 2007). El tipus de trampa pot ser essencial per obtenir un nivell òptim de captures, com s'ha vist amb el coleòpter *Popillia japonica* (Alm i Dawson, 2003). També condiciona la seva posició (De Lame i Gut, 2006) i la separació entre elles (Blackshaw i Vernon, 2008).

**Trampeig massiu**

El trampeig massiu ha de capturar un nombre elevat d'insectes abans de la còpula o l'ovoposició per tal d'aconseguir una reducció de la població. Amb els lepidòpters és essencial que els mascles es capturin abans de la còpula i això és més probable que així succeeixi en aquells insectes que copulen un sol cop. Amb els coleòpters es recomana que la captura d'ambdós sexes (si la feromona és d'agregació) sigui anterior a la posta i/o als danys produïts pels adults quan s'alimenten.

El mecanisme de reducció de la població és diferent segons el tipus de semioquímic utilitzat. En els lepidòpters (Wang *et al*., 2005) i alguns coleòpters (Carvalho i Meixa, 2003) la feromona sexual de la femella és la utilitzada per atreure els mascles. En altres coleòpters, per exemple els escolítids, s'utilitzen amb preferència feromones d'agregació, en alguns casos soles (Aukema *et al*., 2000) o bé en combinació amb atraients alimentaris (Faleiro *et al*., 2003). En algunes ocasions es poden utilitzar compostos volàtils de l'arbre hoste, com en el cas del coleòpter *Hoplia communis*, que pot ser capturat en massa pel 2-feniletanol, un compost majoritari de la flor hoste *Rosa* spp. (Imai *et al.*, 1998), o també atraients sintètics basats en l'aliment, com succeeix amb la mosca mediterrània de la fruita (*Ceratitis capitata*) (McQuate *et al*., 2005).

Un dels principals inconvenients del trampeig massiu és el cost econòmic, que ha de ser optimitzat en cada cas, sobretot si l'èxit de la tècnica implica una reducció de l'ús d'insecticides (Broumas *et al*., 2002). Per exemple, a Costa Rica es va obtenir un control adequat del bequerut de la palmera americana (*Rhyncophorus palmarum*) utilitzant menys d'una trampa per cada 5 ha (Oehlschlager *et al*., 2002). Una manera de reduir costos és intentar controlar més d'una espècie en el mateix experiment. Així, a Costa Rica i Hondures es van duu a terme experiències per reduir les poblacions del bequerut de la canya de sucre (*Metamasius hemipterus*) i el de la palmera americana (*R. palmarum*) fent servir barreges de les seves respectives feromones d'agregació (Alpizar *et al*., 2002).

Un exemple clàssic de trampeig massiu és el portat a terme a Noruega i Suècia entre 1979 i 1981 contra la plaga de l'avet *Ips typographus*. Les trampes es van col·locar en espais oberts a prop d'arbres morts prèviament (una trampa per cada tres arbres infestats). Al 1979 es van col·locar unes 600.000 trampes a Noruega per cobrir una àrea de 4 milions d'hectàrees; al 1980 van ser unes 650.000 i al 1981, 590.000. Es van capturar molts milions d'insectes de manera que la quantitat d'arbres afectats es va reduir d'1.100.000 $m^3$ al 1978 fins a 300.000 $m^3$ al 1981 (Bakke, 1982).

El control de la processionària del pi a Espanya també es porta terme amb experiments de trampeig massiu en un context de control integrat. La feromona (*pityolure*, fig. 4) s'aplica en dosis d'1 mg/ha amb trampes dissenyades especialment per a la seva captura (fig. 9) i cobreix una superfície d'unes 200.000 ha. L'èxit del resultat es fa palès amb la pràctica desaparició de la plaga a l'illa d'Eivissa. Una irrupció inesperada de la plaga a l'illa al 1993 va propiciar la col·locació d'unes 7.000 trampes de feromona en 15.000 ha com a únic sistema de tractament. Es van capturar uns 800 mascles. Al 1994 un tractament similar va comportar la captura de només 450 mascles, i dos anys més tard (1996) a tota l'illa es van capturar menys de 10 insectes.



Figura 9. Trampa especialment dissenyada per a la captura de la processionària del pi i utilitzada en el tractament d'aquesta plaga.

## Confusió

La confusió sexual és el mètode d'aplicació de semioquímics que s'utilitza de forma més àmplia en el control de plagues (Witzgall *et al*., 2008) perquè evita l'acoblament i per tant redueix el nombre de larves noves de la propera generació. La confusió es porta a terme mitjançant l'emissió de grans quantitats de feromona o de l'anàleg d'aquesta (paraferomona) a l'àrea a tractar, de manera que dificulta notablement els acoblaments. Aquesta tècnica s'ha utilitzat amb èxit en espècies de diferents ordres d'insectes (Cardé i Minks, 1995), coleòpters (Koppenhofer *et al*., 2005), hemípters (Walton *et al*., 2006) i heteròpters (Kakizaki, 2004). A la taula 1 es mostren diversos exemples d'experiències de confusió sexual en els quals la utilització de feromones sexuals o els anàlegs han tingut èxit.

La confusió sexual presenta certs avantatges com a tècnica de control de plagues: és específica, té un impacte ambiental baix i és més sostenible que altres tècniques d'espectre ampli sense evidència de resistència. No obstant això, s'ha trobat resistència als tractaments amb un compost feromonal únic en el tortrícid de la plaga del te *Adoxophies honmai* (Mochizuki *et al*., 2002). L'eficàcia de l'acetat de (*Z*)-11-tetradecenil, un compost feromonal molt corrent en altres lepidòpters, va disminuir després de 16 anys de tractament. La composició feromonal emesa per les femelles no va canviar, però el llindar de resposta a la feromona es va incrementar en els mascles resistents. L'eficàcia de la confusió va tornar als valors originals quan es va utilitzar novament la mescla feromonal natural (Tabata *et al.*, 2007). Per altra banda, la confusió sexual té també desavantatges importants. A causa de la seva especificitat, sovint és més costosa que els tractaments amb insecticides d'espectre ampli, en particular si s'utilitzen compostos complexos o inestables. L'èxit de l'experiment sovint és difícil de demostrar i a vegades és inconsistent, ja que la possible reducció de les captures a les trampes de feromona a les parcel·les tractades pot no tenir una correspondència amb el nivell de postes i de danys produïts per les larves de la següent generació (Borchert i Walgenbach, 2000; Stelinski *et al.*, 2007).

La confusió sexual és més eficaç en àrees grans perquè allà es disminueix l'impacte de les femelles gràvides que immigren vers l'interior de les parcel·les tractades. A més, a les àrees extenses és més fàcil el tractament aeri i es pot arribar a quasi anular la negativitat de l'efecte marge. Per altra banda, l'aplicació global de la feromona es pot reduir a mesura que l'àrea a tractar s'incrementa el que condueix a un estalvi considerable del cost del tractament. Recentment, hi ha hagut experiències que han tingut èxit amb barreges de formulacions atraients per controlar més d'una espècie al mateix temps. Aquest ha estat el cas, per exemple, de la carpocapsa o arna de les pomes (*Cydia pomonella*) i de l'arna oriental del préssec (*Grapholita molesta*) (Evenden i McClaughlin, 2005; Il'ichev *et al*., 2007), o el de quatre espècies diferents en camps de pomeres (Gronning *et al*., 2000).

Taula 1. Alguns casos recents de tractament de confusió amb èxit mitjançant feromones sexuals o anàlegs.

| Nom comú anglès | Espècie | Conreu | País | Àrea tractada (ha) |
|---|---|---|---|---|
| Codling moth | *Cydia pomonella* | Poma, pera | USA, Itàlia, Sud-àfrica | 90.000 |
| Pink bollworm | *Pectinophora gossypiella* | Cotó | USA, Israel, Sud-amèrica, UE | 50.000 |
| Gypsy moth | *Lymantria dispar* | Bosc | USA | 150.000 |
| Grapevine moth | *Lobesia botrana* | Vinya | USA, Xile, UE | 100.000 |
| Tomato pinworm moth | *Keiferia lycopersicella* | Tomàquet | Mèxic | 10.000 |
| Oriental fruit moth | *Grapholitha molesta* | Préssec, poma | USA, Austràlia, Itàlia | 38.000 |
| Cherry tree borer | *Synanthedon hector* | Cirera | Japó | 3.800 |
| Striped stem borer | *Chilo suppressalis* | Arròs | Espanya | 20.000 |
| Grapeberry moth | *Eupoecilia ambiguella* | Vinya | UE | 45.000 |
| Mountain pine beetle | *Dendroctonus ponderosae* | Pi | USA, Canadà | --- |

### Utilització d'anàlegs feromonals

S'han desenvolupat una gran quantitat d'anàlegs de feromones amb la finalitat de preparar compostos mimètics, que tenen una activitat similar (tot i que sempre menor) que les mateixes feromones, i agonistes o antagonistes de feromones que augmenten o redueixen, respectivament, l'activitat atraient de les feromones naturals. Aquests compostos es denominen de forma genèrica paraferomones (Renou i Guerrero, 2000). L'activitat intrínseca de les paraferomones és molt variable i mentre que molts anàlegs no mostren activitat de modificació significativa del comportament a concentracions fisiològiques, alguns sí ho fan a dosis altes.

La capacitat de les paraferomones de modular les respostes del comportament dels insectes a la seva mateixa feromona ha donat resultats prometedors en alguns casos. Així, s'ha obtingut un increment d'activitat (agonisme) quan la feromona es barreja amb derivats bromats (Roelofs i Comeau, 1971), formiats i propionats (Camps *et al*., 1988) o feromones fluorades (Bengtsson *et al*., 1990). No obstant això, aquests exemples de sinergia són més aviat excepcionals. En general, la introducció d'un anàleg indueix una disminució de l'activitat de la feromona i la dosi d'aquell per tal d'induir l'antagonisme pot variar des del 0,1% per a l'alcohol del component majoritari de la feromona de l'arna de la col (*Mamestra brassicae*) fins al 1000% per a un isòmer de configuració de la feromona del coleòpter *Carpophilus freemani* (Renou i Guerrero, 2000). L'aplicació pràctica d'antagonistes al camp és bastant escassa, tot i que s'han descrit experiències amb èxit en el control de la plaga del taronger *Amyelois transitella* (Curtis *et al.*, 1987) i del tòrtrix del pèsol (*Cydia nigricana*) (Bengtsson *et al*., 1994). Durant els darrers anys, el nostre equip ha demostrat, amb proves de laboratori i de camp sobre diferents insectes, la utilització esperançadora de trifluorometilcetones anàlogues al component principal de la feromona com antagonistes (Renou *et al*., 1997; Bau *et al.*, 1999; Riba *et al*., 2001, Riba *et al.*, 2005). Cal destacar les experiències de confusió portades a terme entre 2004 i 2006 en camps de blat de moro atacats pel lepidòpter noctuid *Sesamia nonagrioides*. En aquestes experiències, la utilització de la trifluorometilcetona anàloga de la feromona aplicada en dosis de 80 g/ha ha comportat una reducció del 86 al 90% del nombre de plantes atacades i entre un 67 i un 98% del nombre de larves per planta en les parcel·les tractades davant de les no tractades (Solé *et al.*, 2008). A més, es va obtenir també una reducció considerable en els danys produïts per l'espècie simpàtrica *Ostrinia nubilalis*.

### Agraïments

Agraeixo als meus col·laboradors i estudiants l'esforç dedicat a les nostres investigacions així com al MICINN (projecte AGL2009-13452-C02 i anteriors) i a la Generalitat de Catalunya (AGAUR 2009 AGR 871) el seu suport financer.

### Bibliografia

Adachi, I., Uchino, K. i Mochizuki, F. (2007). Development of a pyramidal trap for monitoring fruit-piercing stink bugs baited with *Plautia crossota stali* (Hemiptera: Pentatomidae) aggregation pheromone. *Applied Entomology and Zoology*, 42: 425-431.

Alm, S.R., i Dawson, C.G. (2003). Evaluation of two prototype traps and existing trap designs for captures of Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae). *Journal of Economic Entomology*, 96: 453-455.

Alpizar, D., Fallas, M., Oehlschlager, A.C., Gonzalez, L.M., Chinchilla, C.M. i Bulgarelli, J. (2002). Pheromone mass trapping of the west Indian sugarcane weevil and the American palm weevil (Coleoptera: Curculionidae) in palmito palm. *Florida Entomologist*, 85: 426-430.

Allison, J.D., Morewood, W.D., Borden, J.H., Hein, K.E. i Wilson, I.M. (2003). Differential bio-activity of *Ips* and *Dendroctonus* (Coleoptera: Scolytidae) pheromone components for *Monochamus clamator* and *M. scutellatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Environmental Entomology*, 32: 23-30.

Ando, T., Inomata, S. i Yamamoto, M. (2004). Lepidopteran Sex Pheromones. *In*: S. Schulz (ed.), *The Chemistry of Pheromones and Other Semiochemicals I*, pp. 51-96. Springer-Verlag. Berlin.

Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Gakis, S.F., Kyrtsa, L.A., Mazomenos, B.E. i Gravanis, F.T. (2007). Influence of trap type, trap colour, and trapping location on the capture of the pine moth, *Thaumetopoea pityocampa*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 122: 117-123.

Aukema, B.H., Dahlsten, D.L. i Raffa, K.F. (2000). Exploiting behavioral disparities among predators and prey to selectively remove pests: Maximizing the ratio of bark beetles to predators removed during semiochemically based trap-out. *Environmental Entomology*, 29: 651-660.

Bäckman, A.-C., Anderson, P., Bengtsson, M., Löfqvist, J., Unelius, C.R. i Witzgall, P. (2000). Antennal response of codling moth males, *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae), to the geometric isomers of codlemone and codlemone acetate. *Journal of Comparative Physiology*, 186: 513-519.

Baker, T.C. i Cardé, R.T. (1984). Techniques for behavioral bioassays. *In*: H.E. Hummel i T.A. Miller (eds.), *Techniques in Pheromone Research*, pp. 45-73. Springer-Verlag. New York.

Bakke, A. (1982). Utilization of aggregation pheromones for control of the spruce bark beetle. *In*: B.A. Leonhardt i M. Beroza (eds.), *Insect Pheromone Technology: Chemistry and Applications*, pp. 219-227. American Chemical Society. Washington D.C.

Bau, J., Martinez, D., Renou, M. i Guerrero, A. (1999). Pheromone-triggered orientation flight of male moths can be disrupted by trifluoromethyl ketones. *Chemical Senses*, 24: 473-480.

Bengtsson, M., Karg, G., Kirsch, P.A., Löfqvist, J., Sauer, A. i Witzgall, P. (1994). Mating disruption of pea moth *Cydia nigricana* F. (Lepidoptera: Tortricidae) by a repellent blend of sex pheromone and attraction inhibitors. *Journal of Chemical Ecology*, 20: 871-887.

Bengtsson, M., Rauscher, S., Arn, H., Sun, W.-C. i Prestwich, G.D. (1990). Fluorine-substituted pheromone component affect the behavior of the grape berry moth. *Experientia*, 46: 1211-1213.

Blackshaw, R.P., i Vernon, R.S. (2008). Spatial relationships between two *Agriotes* click-beetle species and wireworms in agricultural fields. *Agricultural and Forest Entomology*, 10: 1-11.

Borchert, D.M. i Walgenbach, J.F. (2000). Comparison of pheromone-mediated mating disruption and conventional insecticides for management of tufted apple bud moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 93: 769-776.

Breuer, M., Kontzog, H.G., Guerrero, A., Camps, F., i De Loof, A. (2003). Field trials with the synthetic sex pheromone of the oak processionary moth *Thaumetopoea processionea*. *Journal of Chemical Ecology*, 29: 2461-2468.

Broumas, T., Haniotakis, G., Liaropoulos, C., Tomazou, T. i Ragoussis, N. (2002). The efficacy of an improved form of the mass-trapping method, for the control of the olive fruit fly, *Bactrocera oleae* (Gmelin) (Dipt., Tephritidae): pilot-scale feasibility studies. *Journal of Applied Entomology*, 126: 217-223.

Bursell, E., Gough, J.E., Beevor, P.S., Cork, A., Hall, D.R. i Vale, G.A. (1988). Identification of components of cattle urine attractive to tsetse flies, *Glossina* spp. (Diptera: Glossinidae). *Bulletin of Entomological Research*, 78: 281-291.

Camps, F., Fabriàs, G., Gasol, V., Guerrero, A., Hernández, R. i Montoya, R. (1988). Analogs of the sex pheromone of processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*: Synthesis and biological activity. *Journal of Chemical Ecology*, 14: 1331-1346.

Cardé, R.T. i Minks, A.K. (1995). Control of moth pests by mating disruption: Successes and constraints. *Annual Review of Entomology*, 40: 559-585.

Carvalho, M.O. i Mexia, A. (2003). Use of pheromone traps for mass trapping of *Lasioderma serricorne* in a cigarette factory in Portugal. *Advances in Stored Product Protection,* pp. 222-229.

Cork, A., Alam, S.N., Rouf, F.M.A. i Talekar, N.S. (2005). Development of mass trapping technique for control of brinjal shoot and fruit borer, *Leucinodes orbonalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Bulletin of Entomological Research*, 95: 589-596.

Curtis, C.E., Clark, J.D., Carlson, D.A. i Coffelt, J.A. (1987). A pheromone mimic: Disruption of mating communication in the navel orangeworm, *Amyelois transitella*, with Z,Z-1,12,14-heptadecatriene. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 44: 249-255.

De Lame, F.M. i Gut, L.J. (2006). Effect of monitoring trap and mating disruption dispenser application heights on captures of male *Grapholita molesta* (Busck; Lepidoptera: Tortricidae) in pheromone and virgin female-baited traps. *Environmental Entomology*, 35: 1058-1068.

Dunkelblum, E., Harel, M., Assael, F., Mori, K. i Mendel, Z. (2000). Specificity of pheromonal and kairomonal response of the Israeli pine bast scale *Matsucoccus josephi* and its predator *Elatophilus hebraicus*. *Journal of Chemical Ecology*, 26: 1649-1657.

El-Sayed, A.M. (2008). The Pherobase: database of insect pheromones and semiochemicals. *www.pherobase.com*.

El-Sayed, A.M., Wainman, L.I., Santangelo, E.M., Unelius, C.R. i Trimble, R.M. (2005). Sex pheromone of a North American population of the spotted tentiform leafminer, *Phyllonorycter blancardella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 116: 143-148.

Evenden, M.L. i McClaughlin, J. R. (2005). Male oriental fruit moth response to a combined pheromone-based attracticide formulation targeting both oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 98: 317-325.

Faleiro, J.R., Rangnekar, P.A. i Satarkar, V.R. (2003). Age and fecundity of female red palm weevils *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Rhynchophoridae) captured by pheromone traps in coconut plantations of India. *Crop Protection*, 22: 999-1002.

Gronning, E.K., Borchert, D.M., Pfeiffer, D.G., Felland, C.M., Walgenbach, J.F., Hull, L.A. i Killian, J.C. (2000). Effect of specific and generic sex attractant blends on pheromone trap captures of four leafroller species in mid-Atlantic apple orchards. *Journal of*

*Economic Entomology*, 93: 157-164.
Guerrero, A., Camps, F., Coll, J., Riba, M., Einhorn, J., Descoins, C. i Lallemand, J.Y. (1981). Identification of a potential sex pheromone of the processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera, Notodontidae). *Tetrahedron Letters*, 22: 2013-2016.
Guerrero, A., Murgó, R. i Martorell, X. (1986). An improved electroantennogram apparatus with a new automatic sample injection system. *Physiological Entomology*, 11: 273-277
Headrick, D.H. i Gordh, G. (2001). *A Dictionary of Entomology*. 1031 pp. CABI Publishing, New York.
Hilman, B. (1990). Alternative Agriculture. *Chemical Engineering News*, Mar. 5: 26-40.
Il'ichev, A.L., Williams, D.G. i Gut, L.J. (2007). Dual pheromone dispenser for combined control of codling moth *Cydia pomonella* L. and oriental fruit moth *Grapholita molesta* (Busck) (Lep., Tortricidae) in pears. *Journal of Applied Entomology*, 131: 368-376.
Imai, T., Maekawa, M., Tsuchiya, S. i Fujimori, T. (1998). Field attraction of *Hoplia communis* to 2-phenylethanol, a major volatile component from host flowers, *Rosa* spp. *Journal of Chemical Ecology*, 24: 1491-1497.
Kakizaki, M. (2004). The sex pheromone components for mating disruption of the rice leaf bug, *Trigonotylus caelestialium* (Heteroptera: Miridae). *Applied Entomology and Zoology*, 39: 221-228.
Karlson, P. i Luscher, M. (1959). Pheromones - New term for a class of biologically active substances. *Nature*, 183: 55-56.
Knols, B.G.J., de Jong, R., i Takken, W. (1994). Trapping system for testing olfactory responses of the malaria mosquito *Anopheles gambiae* in a wind tunnel. *Medical Veterinary Entomology*, 8: 386-388.
Koppenhofer, A.M., Polavarapu, S., Fuzy, E.M., Zhang, A.J., Ketner, K. i Larsen, T. (2005). Mating disruption of oriental beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) in turfgrass using microencapsulated formulations of sex pheromone components. *Environmental Entomology*, 34: 1408-1417.
Leal, W.S., Shi, X.W., Liang, D.S., Schal, C. i Meinwald, J. (1995). Application of chiral gas chromatography with electroantennographic detection to the determination of the stereochemistry of a cockroach sex pheromone. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92: 1033-1037.
Malo, E.A., Renou, M. i Guerrero, A. (2000). Analytical studies of *Spodoptera littoralis* sex pheromone components by electroantennography and coupled gas chromatography-electroantennographic detection. *Talanta*, 52: 525-532.
McQuate, G.T., Sylva, C.D. i Jang, E. B. (2005). Mediterranean fruit fly (Dipt., Tephritidae) suppression in persimmon through bait sprays in adjacent coffee plantings. *Journal of Applied Entomology*, 129: 110-117.
Millar, J.G. i Haynes, K.F. (eds.). 1998. *Methods in Chemical Ecology - Chemical Methods*. Norwell, MA, Kluwer Acad. Pub. 390 pp.
Mochizuki, F., Fukumoto, T., Noguchi, H., Sugie, H., Morimoto, T. i Ohtani, K. (2002). Resistance to a mating disruptant composed of (Z)-11-tetradecenyl acetate in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* (Yasuda) (Lepidoptera: Tortricidae). *Applied Entomology and Zoology*, 37: 299-304.
Oehlschlager, A.C., Chinchilla, C., Castillo, G., i Gonzalez, L. (2002). Control of red ring disease by mass trapping of *Rhynchophorus palmarum* (Coleoptera: Curculionidae). *Florida Entomologist*, 85: 507-513.
Papadopoulos, N.T., Katsoyannos, B.I., Kouloussis, N.A., Hendrichs, J., Carey, J.R., i Heath, R.R. (2001). Early detection and population monitoring of *Ceratitis capitata* (Diptera : Tephritidae) in a mixed-fruit orchard in northern Greece. *Journal of Economic Entomology*, 94: 971-978.
Park, K.C. i Baker, T.C. (2002). Improvement of signal-to-noise ratio in electroantennogram responses using multiple insect antennae. *Journal of Insect Physiology*, 48: 1139-1145.
Quero, C., Malo, E.A., Fabrias, G., Camps, F., Lucas, P., Renou, M. i Guerrero, A. (1997). Reinvestigation of female sex pheromone of processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*): No evidence for minor components. *Journal of Chemical Ecology*, 23: 713-726.
Renou, M. i Guerrero, A. (2000). Insect parapheromones in olfaction research and semiochemical-based pest control strategies. *Annual Review of Entomology*, 48: 605-630.
Renou, M., Lucas, P., Malo, E., Quero, C. i Guerrero, A. (1997). Effects of trifluoromethyl ketones and related compounds on the EAG and behavioral responses to pheromones in male moths. *Chemical Senses*, 22: 407-416.
Riba, M., Sans, A., Bau, P., Grolleau, G., Renou, M. i Guerrero, A. (2001). Pheromone response inhibitors of the corn stalk borer *Sesamia nonagrioides*. Biological evaluation and toxicology. *Journal of Chemical Ecology*, 27: 1879-1897.
Riba, M., Sans, A., Solé, J., Muñoz, L., Bosch, M.P., Rosell, G. i Guerrero, A. (2005). Antagonism of pheromone response of *Ostrinia nubilalis* males and implications on behavior in the laboratory and in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53: 1158-1165.

Roelofs, W.L. (1984). Electroantennogram assays: rapid and convenient screening procedures for pheromones. *In*: H.E. Hummel i T.A. Miller (eds.), *Techniques in Pheromone Research*, pp. 131-159. Springer-Verlag. New York.

Roelofs, W.L. i Comeau, A. (1971). Sex pheromone perception: synergists and inhibitors for the red-banded leaf roller attractant. *Journal of Insect Physiology*, 17: 435-448.

Rumbo, E.R., Suckling, D.M. i Karg, G. (1995). Measurement of airborne pheromone concentrations using electroantennograms: interactions between environmental volatiles and pheromone. *Journal of Insect Physiology*, 41: 465-471.

Schneider, D. (1957). Elektrophysiologische Untersuchungen von Chemo- und Mechanorezeptoren der Antenne des Seidenspinners *Bombyx mori* L. *Zeitschrift für Vergleichende Physiologie*, 40: 8-41.

Shani, A. (2000). Chemical communication agents (pheromones) in Integrated Pest Management. *Drug Development Research*, 50: 400-405.

Solé, J., Sans, A., Riba, M., Rosa, E., Bosch, M.P., Barrot, M., Palència, J., Castellà, J. i Guerrero, A. (2008). Reduction of damage by the Mediterranean corn borer *Sesamia nonagrioides* and the European corn borer *Ostrinia nubilalis* in maize fields by a trifluoromethyl ketone pheromone analogue. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 126: 28-39.

Stelinski, L.L., Gut, L.J., Haas, M., McGhee, P. i Epstein, D. (2007). Evaluation of aerosol devices for simultaneous disruption of sex pheromone communication in *Cydia pomonella* and *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Pest Science*, 80: 225-233.

Sureda, T., Quero, C., Bosch, M.P., Avilés, R., Coll, F., Renou, M. i Guerrero, A. (2006). Electrophysiological and behavioral responses of a Cuban population of the sweet potato weevil to its sex pheromone. *Journal of Chemical Ecology*, 32: 2177-2190.

Tabata, J., Noguchi, H., Kainoh, Y., Mochizuki, F., i Sugie, H. (2007). Behavioral response to sex pheromone component blends in the mating disruption-resistant strain of the smaller tea tortrix, *Adoxophies honmai* Yasuda (Lepidoptera: Tortricidae), and its mode of inheritance. *Applied Entomology and Zoology*, 42: 675-683.

Wadhams, L.J. (1984). The coupled gas cromatography-single cell recording technique. *In*: H.E. Hummel i T.A. Miller (eds.), *Techniques in Pheromone Research*, pp. 179-189. Springer-Verlag. New York.

Wadhams, L.J. (1990). The used of coupled gas chromatography:electrophysiological techniques in the identification of insect pheromones. *In*: A.R. McCaffery i I.D. Wilson (eds.), *Chromatography and Isolation of Insect Hormones and Pheromones*, p 289-298. Plenum Press. New York.

Walton, V.M., Daane, K.M., Bentley, W.J., Millar, J.G., Larsen, T.E. i Malakar-Kuenen, R. (2006). Pheromone-based mating disruption of *Planococcus ficus* (Hemiptera: Pseudococcidae) in California vineyards. *Journal of Economic Entomology*, 99: 1280-1290.

Wang, Y.M., Ge, F., Liu, X.H., Feng, F. i Wang, L.J. (2005). Evaluation of mass-trapping for control of tea tussock moth *Euproctis pseudoconspersa* (Strand) (Lepidoptera: Lymantriidae) with synthetic sex pheromone in south China. *International Journal of Pest Management*, 51: 289-295.

WHO. (1999). Microbial pest control agent *Bacillus thuringiensis*. UNEP/ILO/WHO. Geneva.

Wibe, A. (2004). How the choice of method influence on the results in electrophysiological studies of insect olfaction. *Journal of Insect Physiology*, 50: 497-503.

Witzgall, P., Stelinski, L., Gut, L. i Thomson, D. (2008). Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53: 503-522.