

Modelos matemáticos de depredador-presa en cultivos hortícolas en invernadero en el Sudeste de la Península Ibérica

M. GÁMEZ, R. CARREÑO, A. S. ANDÚJAR, P. BARRANCO Y T. CABELLO

La búsqueda de soluciones a la importante incidencia económica de las plagas en los cultivos ha sufrido, como es natural, una evolución a lo largo del tiempo, que ha sido muy rápida en las últimas décadas. Así en el estudio de la dinámica de población de las especies plaga, dentro del cultivo, es fundamental considerar los sistemas depredador-presa, parasitoide-hospedante, y patógeno- hospedante, según sea el tipo de enemigo natural en el que estemos interesados.

Como aplicación de los modelos depredador-presa se han hecho estudios relativos a especies plaga en cultivos hortícolas bajo plástico. En concreto dos cultivos: pimiento y tomate, afectados por tres grupos de especies plaga de gran severidad económica: "heliothis del tomate", "mosca blanca" y el "trips occidental de las flores". Como depredadores para el control biológico de estas especies plaga, destacan dos: "Orius" y "Macrolophus".

Analizamos desde el punto de vista matemático las condiciones suficientes para la existencia de atractores globales, de las soluciones de los posibles sistemas diferenciales (depredador-presa generalmente de tipo periódico) que pueden modelar este proceso. Además, se han realizado ajustes con los citados modelos, analizando su buena adecuación mediante coeficientes estadísticos.

M. GÁMEZ; R. CARREÑO y A. S. ANDÚJAR: Departamento de Estadística y Matemática Aplicada. Universidad de Almería. 04120 La Cañada (Almería).

P. BARRANCO y T. CABELLO: Entomología Agrícola. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería. 04120 La Cañada (Almería).

Palabras clave: depredador-presa, control biológico, cultivos en invernadero, modelos poblacionales.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de soluciones a la importante incidencia económica de plagas en los cultivos ha sufrido, como es natural, una evolución a lo largo del tiempo, que ha sido muy rápida en las últimas décadas, de esta manera, y como consecuencia del mejor conocimiento del agroecosistema, el enfoque del control de plagas de los cultivos pasa por la aplicación de soluciones alternativas (p.e.: lucha biológica y lucha integrada) (BAUNGÄRTER y GUTIÉRREZ, 1989; NORTON y MUMFORD, 1993; CABELLO, 1998). También es importante resaltar

el papel que en los últimos años ha tenido el análisis de sistemas en la agricultura en general, pero especialmente en el control de plagas y enfermedades, concretamente en su aproximación analítica, el cual ha sido recientemente revisado por CARREÑO (1996).

Los enemigos naturales constituyen un factor fundamental en la regulación de las poblaciones de las especies plagas, y por tanto en su posterior incidencia económica en el cultivo (HILL, 1987; DENT, 1991). Ellos, conjuntamente con otros factores bióticos y abióticos, originan una mortalidad que va a regular las poblaciones de las pla-

gas, es lo que se denomina "control natural". En el caso concreto del agrosistema, de todos los factores de control natural, es la acción de los enemigos naturales (depredadores, parasitoides y patógenos) el de mayor incidencia sobre las poblaciones de las plagas; y responsables, por tanto, del grado de severidad del daño originado por ellas (HUFFAKER, 1980; HUFFAKER y RABB, 1984).

En el estudio de la dinámica de población de las especies plagas, dentro del cultivo, es fundamental considerar los sistemas depredador-presa, parasitoide-hospedante y patógeno-hospedante; según sea el tipo de enemigo natural en el que estemos interesados (depredador, parasitoide o patógeno). En relación a la descripción del sistema depredador-presa (parasitoide-hospedante), numerosos han sido los trabajos que han abordado el tema desde un punto de vista matemático; especialmente destacan los trabajos iniciales de LOKTA (1925), VOLTERRA (1926), NICHOLSON (1933), y NICHOLSON y BAILEY (1935); los posteriores de SOLOMON (1949), WATT (1959), HOLLING (1959, 1963, 1966), HASSELL (1966); ROYAMA (1971); HUFFAKER y STINNER (1971); y CURRY y DeMICHELE (1977). En la actualidad se han revisado los trabajos realizados sobre la relación depredador-presa, cuando se aplican, como el presente caso, a insectos plagas (MILLS y GETZ, 1996).

Las aplicaciones prácticas de la relación depredador-presa para el estudio de la importancia del papel del control natural en la dinámica de población de las especies plaga, como en la utilización de la lucha biológica, se señalaron muy posteriormente a su desarrollo matemático (HASSELL y WAAGE, 1984; HASSELL, 1988; MAY y HASSELL, 1988; MACKAUER *et al.*, 1990); por lo tanto, pocos han sido los trabajos que han abordado este aspecto de aplicación. En el caso de evaluación del control natural debemos señalar los trabajos sobre tres grupos de especies plagas: áfidos (GUTIÉRREZ *et*

al., 1984), ácaros (SABELIS, 1985) y tisanópteros (LEWIS, 1997).

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la aplicación del modelo se han elegido dos cultivos: pimiento y tomate; así como tres grupos de especies plaga de gran severidad económica en los mismos: La "Heliothis del tomate", lepidótero, Noctuido, denominado: *Helicoverpa armigera* (Hb.), la "mosca blanca", nombre común que corresponde al Homóptero, Aleyrodido: *Bemisia tabaci* (Gen.), y finalmente el Tisanóptero, Trípido: *Frankliniella occidentalis* (Pergande), que se denomina comúnmente "trips occidental de las flores". Los depredadores empleados en el control biológico: Orius y Macrolophus.

Los datos utilizados en el ajuste, que no han sido publicados, corresponden a los resultados de tres ensayos realizados en el control biológico de las especies plagas, con los depredadores anteriormente mencionados (CABELLO, 1998, com. pers.; GARCÍA JIMÉNEZ, 1998, com. pers. NOVARTIS BCM).

- a) En el caso de un sólo depredador y una presa, se han utilizado los datos de los ensayos de control biológico mediante el depredador *Orius* sp. sobre la especie plaga *Frankliniella occidentalis* en cultivo de pimiento de la variedad California en invernaderos localizados en la Mojonera (Almería), durante las campañas 1991/92 y 1997/98. El primer ensayo se realizó en un invernadero de 2000 m² con cultivo de pimiento, variedad Tango, y un marco de plantación de 2 plantas por m². Las plantas fueron trasplantadas el 08/08/91, finalizando el ensayo el 26/11/91. Se realizaron un total de 10 muestras poblacionales de adultos y larvas, donde los muestreos se llevaron a cabo semanalmente eligiéndose al azar 12 filas de cultivo en cada parcela (360 m²), en cada fila, se tomaron 3 grupos de 3

plantas (9 plantas/fila), recogiendo 3 frutos en cada grupo de plantas (total 108 frutos en cada parcela). Las tasas de liberación de depredador fue de 1 individuo/ m², los días: 18/09/91, 04/10/91, 25/10/91, 30/10/91 y 15/11/91. En el segundo caso, el invernadero tenía una extensión 3.500 m² con un marco de plantación de 2 plantas por m² en cultivo hidropónico de fibra de coco. El muestreo se realizó sobre flores y hojas, revisándose dos hojas jóvenes, dos hojas medias y dos flores por planta cada quince días. Se muestrearon 15 plantas fijas y 5 plantas al azar durante 30 semanas, comenzando la toma de datos el 01/10/97. La dosis de suelta fue la misma que en el primer caso, pero sólo se realizó una vez, concretamente en la semana décima.

- b) Para el caso de dos presas y un solo depredador, se emplearon los datos de lucha biológica de *Helicoverpa armigera* y *Bemisia tabaci*, con el depredador: *Macrolophus caliginosus*. Se utilizó un invernadero de 4.620 m² de tomate de la variedad Daniela con un marco de plantación de 2 plantas por m² localizado en Mazarrón (Murcia) durante la campaña 1996/97. El muestreo se realizó semanalmente, tanto del depredador como de la presa, sobre 15 plantas fijas y 5 sorteadas al azar, tomando dos hojas en la parte alta, dos hojas en la parte media y dos en la parte baja de la planta, durante 20 semanas. La fecha de inicio del recuento fue el 30/10/96. La dosis de liberación del depredador fue de 1 por planta, y se realizó en la semana octava.

Para los ajustes realizados se utiliza el siguiente material informático: Papyrus, Mathematica 3.0 y Office 97.

Con respecto a la aplicación de los modelos depredador-presa al control biológico se ha realizado un estudio (GÁMEZ, 1999) para el caso de n-presas y un depredador,

donde las presas en ausencia del depredador se consideran que pueden poseer una cooperación (directa o indirecta). Igualmente en dicho trabajo se analizan los sistemas diferenciales que determinan tales modelos desde un punto de vista esencialmente cualitativo, dada la imposibilidad manifiesta, desde el propio Lotka-Volterra, de resolver de manera explícita estas ecuaciones diferenciales, determinando condiciones bajo las cuales podamos conseguir atractores globales o cuencas de atracción para las soluciones positivas que son las que tienen cierto interés en el campo de la biología.

El modelo utilizado en los ajustes es de tipo autónomo, es decir no depende de la variable t, y concretamente está determinado por el siguiente sistema diferencial:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_i \left[a_i - \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j - d_i y \right], \quad 1 \leq i \leq n \\ \dot{y} &= y \left[\alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i - \gamma y \right] \end{aligned} \quad [1]$$

$\alpha, \beta_i, d_i, \gamma > 0, 1 \leq i \leq n$ y además $b_{ii} > 0 > b_{ij}, \forall i = j$. Donde x_i e y miden la densidad de población de la especie presa-(i) y del depredador respectivamente; a_i, α representan las tasas de crecimiento de la especie presa-(i) y del depredador respectivamente; b_{ij} determina la tasa de competición entre las especies x_i, x_j ; γ es la tasa de competición o de fricción del depredador con él mismo; por último, d_i es la tasa de depredación, mientras que β_i mide el beneficio obtenido por el depredador como consecuencia de su convivencia con las especies presa (depredación).

RESULTADOS

a) Aplicación al caso de *Orius-Frankliniella*

En la Figura 1 se recogen los valores observados (símbolos) y los estimados (trazo conti-

nuo) de la dinámica de población de la especie plaga: *Frankliniella occidentalis* y su depredador: *Orius* sp. en flores, en cultivo de pimiento en invernadero, localizado en la Mojonera (Almería), durante la campaña 1991/92. Los coeficientes de ajuste del modelo depredador-presa se recogen en el Cuadro 1, así como los estadísticos de comparación, que presentaron una alta significación ($P < 0,01$).

En la Figura 2 se recogen los valores observados (símbolos) y los estimados (trazo

continuo) de la dinámica de población de la especie plaga: *Frankliniella occidentalis* y su depredador: *Orius* sp. en cultivo de pimiento en invernadero, localizado en la Mojonera (Almería), durante la campaña 1997/98. Los coeficientes de ajuste del modelo depredador-presa se recogen en el Cuadro 2, así como los datos estadísticos de comparación, que presentaron una alta significación ($P < 0,01$).

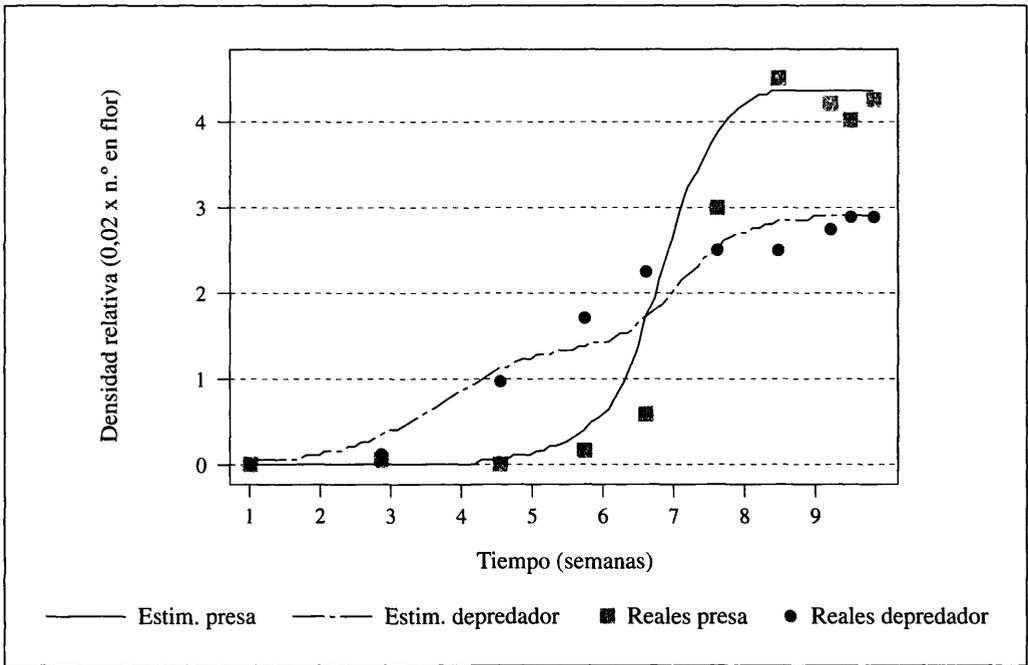


Fig. 1.-Ajuste de *Orius-Frankliniella* en pimiento (flores) al modelo (1) en 1991/1992 La Mojonera (Almería).

Cuadro 1.-Valores de los parámetros obtenidos del ajuste para el modelo (1) al caso de *Orius-Frankliniella* en pimiento (flores) en 1991/1992 La Mojonera (Almería)

Coeficientes del ajuste					Depredador		Presa		
a_1	b_{11}	d_1	α	β_1	γ	g.l. total	r^2	g.l. total	r^2
3.1	0,07	0,99	2,5	0,66	2	8	0,9414	8	0,9619

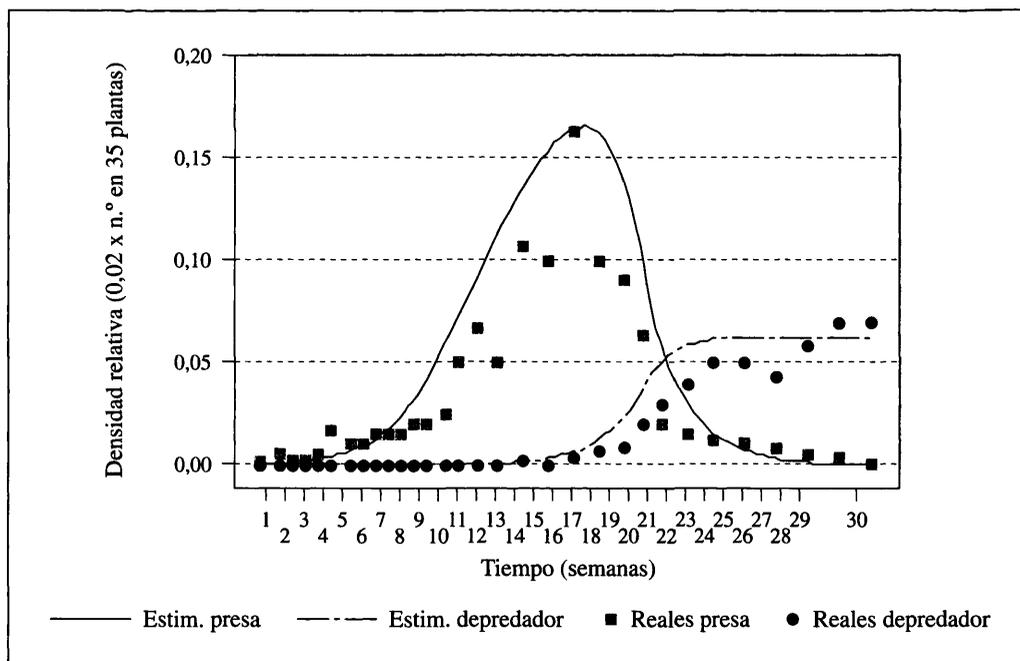


Fig. 2.-Ajuste de *Orius-Frankliniella* en pimiento al modelo (1) en 1997, 1998. La Mojenera (Almería).

Cuadro 2.-Valores de los parámetros obtenidos del ajuste para el modelo (1) al caso de *Orius-Frankliniella* en pimiento en 1997/ 1998. La Mojenera (Almería).

Coeficientes del ajuste					Depredador		Presa		
a_1	b_{11}	d_1	α	β_1	γ	g.l. total	r^2	g.l. total	r^2
0,333	1,1	17	0,25	2,7	5	28	0,9216	28	0,9026

b) Aplicación al caso de *Macrolophus-Bemisia* y *Helicoverpa*

Para el caso del modelo con un depredador y dos presas, la Figura 3 representa los valores observados y estimados de la dinámica de población de dos especies plaga: *Bemisia tabaci* (Hom.: Aleyrodidae) y *Helicoverpa armigera* (Lep.: Noctuidae), y su depredador: *Macrolophus caliginosus* (Hem: Miridae) en cultivo de tomate. Los coeficiente de ajuste, así como sus estadísticos se dan en el Cuadro 3.

DISCUSIÓN

El ajuste obtenido por el modelo depredador-presa a los datos de campo ha sido altamente significativo, por ello estos sistemas pueden por un lado contribuir al conocimiento de la relación entre las dinámicas poblacionales del depredador y sus presas; y por otra parte constituir una importante herramienta para aquilatar las sueltas del depredador en el control biológico de las especies plaga en los cultivos hortícolas.

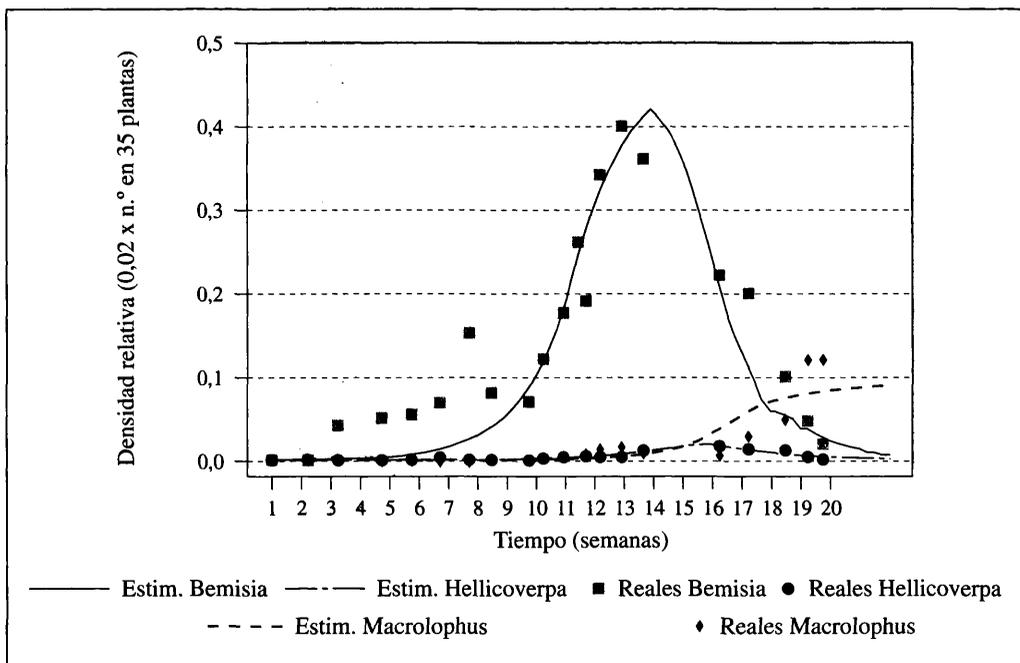


Fig. 3.—Ajuste de *Macrolophus-Bemisia* y *Helicoverpa* en tomate al modelo (1) en 1996/1997. Mazarrón (Murcia).

Cuadro 3.—Valores de los parámetros obtenidos del ajuste para el modelo (1) al caso de *Macrolophus-Bemisia* y *Helicoverpa* en tomate en 1996/1997. Mazarrón (Murcia)

Coeficientes del ajuste					
$a_i \ i = 1,2$	$(b_{ij}) \ i,j = 1,2$	$d_i \ i = 1,2$	α	$\beta_i \ i = 1,2$	γ
0,6	1,1 -6	20	0,2	1	2
0,25	-0,7 7	11		5	
<i>Macrolophus</i>		<i>Bemisia</i>		<i>Helicoverpa</i>	
g.l. total	r^2	g.l. total	r^2	g.l. total	r^2
18	0.8208	18	0.8904	18	0.8208

Su posterior utilización para la evaluación de la eficacia en la depredación debe ser desarrollada, aunque sin embargo se observa que

el presente modelo puede ser útil en dicha valoración, la cual constituye una piedra angular en todos los procesos de control biológico.

ABSTRACT

GÁMEZ, M.; CARREÑO, R.; ANDÚJAR, A. S.; BARRANCO, P. y CABELLO, T. 2000: Predator-prey mathematical model on green-house crops in the south-east of the Iberian Peninsula. *Bol. San. Veg. Plagas*, **26**(2): 665-672.

The search of solutions to the important economic incidence of the plagues in the cultures has experienced, naturally, an evolution throughout the time, which has been very fast in the last decades.

Thus, in the study of the dynamics of population of the plagues species, within the culture, it is fundamental to consider the predator-prey systems, parasitoid-hospedante, and hospedante pathogen, according to the kind of natural enemy which we are interested in.

Researches related to plague species in hortícolas cultures under plastic have been made as application of the predator-prey models. In concrete two cultures: pepper and tomato, affected by three groups of species plague of great economic severity: "heliotis of the tomato", "white fly" and "trips western of the flowers". As predators for the biological control of these plagues species: "Orius" and "Macrolophus" out.

We analyzed from the mathematical point of view the sufficient conditions for the existence of global attractors, of the solutions to the possible differential systems (predator-prey generally of periodic type) which can model this process.

In addition, adjustments with the models mentioned above have been made, analyzing their good adjustment by means of statistical coefficients.

Key words: Predator-prey, biological control, population cultures in conservatory, models.

REFERENCIAS

- BAUNGÄRTNER, J. y GUTIÉRREZ, A. P., 1989: Simulation techniques applied to crops and pest models. En: CAVALLORO, R.; DeLUCCHI, V. (Eds.). *Parasitis 88. Proceeding of a Scientific Congress*. Barcelona 25-28 de octubre 1988. *Boletín de Sanidad Vegetal, Plagas; Fuera de serie*, **17**: 175-214.
- CABELLO, T., 1998: *Racionalización del empleo de fitosanitarios: eficacia, técnicas de aplicación y respeto a la fauna auxiliar*. Encuentro ambiental almeriense. Documentación de la Comisión de Trabajo "Agricultura intensiva". Almería, 26-52.
- CARREÑO, R., 1996: *Modelos logísticos. Aplicaciones a la Agronomía*. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Almería. Tesis Doctoral. Almería, 168 pp.
- CURRY, G. y DeMICHELE, D.W., 1977: Stochastic analysis for the description and synthesis of predator-prey systems. *Can. Ent.*, **109**: 1.167-1.174.
- DENT, D., 1991: *Insect pest management*. C.A.B.-International. Wallingford: 604 pp.
- GÁMEZ, M., 1999: *Modelo depredador-presa. Aplicaciones al control biológico*. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Almería. Tesis Doctoral. Almería, 134 pp.
- GUTIÉRREZ, A. P.; BAUMGAERTNER, J. U., 1984. Multi-trophic levels models of predator-prey: I. Age specific energetics models -pea aphid *Acyrtosiphon pisum*(Harris)(Hom: Aphididae) as an example. *Canadian Entomologist*, **116**: 924-932.
- HASSELL, M. P., 1966: Evaluation of parasites and predator responses. *J. Animal Ecol.*, **35**: 65-75.
- HASSELL, M. P., 1988. *Dinámica de la competencia y la depredación*. Oikos-tau. Barcelona, 102 pp.
- HASSELL, M. P. y WAAGE, J. K., 1984: Host-parasitoid population interactions. *Ann. Rev. Entomol.*, **29**: 89-114.
- HILL, D. S., 1987: *Agricultural insect pests of the tropics and their control*. Cambridge University Press. Cambridge: 746 pp.
- HOLLING, C. S., 1959: Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Can. Ent.*, **91**: 385-398.
- HOLLING, C. S., 1963: An experiment component analysis of populations processes. *Mem. Ent. Soc. Can.*, **32**: 22-32 pp.
- HOLLING, C. S., 1966: The functional response of invertebrate predators to prey density. *Mem. Ent. Soc. Can.*, **48**: 86 pp.
- HILL, D. S., 1987: *Agricultural insect pests of temperate regions and their control*. Cambridge University Press. Cambridge: 659 pp.
- HUFFAKER, C. B. (Ed.), 1980: *New technology of pest control*. John Wiley and Sons. Nueva York: 500 pp.
- HUFFAKER, C. B. y RABB, R. L. (Eds.), 1984: *Ecological entomology*. John Wiley and Sons. Nueva York: 844.
- HUFFAKER, C. B. y STINNER, R., 1971: *The role of natural enemies in pest control programas*. En: Anón. Entomological essays to commemorate the retirement of Prof. K. Yasumatsu. Tokio: 333-350.
- LEWIS, T., 1997: *Trhrips as crops pests*. C.A.B. International. Wallingford: 740 pp.

- LOTKA, A. J., 1925: *Elements of physical biology*. Williams and Wilkins. Baltimore.
- MACKAUER, M.; EHLER, L. E. y ROLAND, J. (Eds.), 1990: *Critical issues in biological control*. Intercept. Andover, 330 pp.
- MAY, R. M. y HASSELL, M. P., 1988: Population dynamics and biological control. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **318**: 129-169.
- MILLS, N. J. y GETZ, W. M., 1996: Modelling the biological control of insect pests-A review of host-parasitoid models. *Ecological modelling*, **92**: 121-143.
- NICHOLSON, A. (1933): The balance of animal populations. *J. Animal Ecol.*, **2**: 132-178.
- NICHOLSON, A. J. y BAILEY, V. A., 1935: *The balance of animal populations, Part 1*. Proc. zool. Soc. London.
- NORTON, G. A. y MUMFORD, J. D., 1993: *Decision tools for pest management*. C.A.B.-International. Wallingford, 279 pp.
- ROYAMA, T., 1971: A comparative study of models for predation and parasitism. *Res. Popul. Ecol. Kyoto Univ.*, **1**: 90 pp.
- SABELIS, M. W., 1985: Predation on spider mites. En: HELLE, W.; SABELIS, M.W. (Eds.). *Spider mites. Their biology, natural enemies and control*. Vol. 1B. Elsevier. Amsterdam: 103-129.
- SOLOMON, M. E., 1949. The natural control of animal populations. *J. Animal Ecol.*, **18**: 1-35.
- VOLTERRA, V., 1926: Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. *Mem. Roy. Acad. Naz. Dei Lincei*, **2**: 31-113.
- WATT, K. E. F., 1959: A mathematical model of the effect of densities of attacked and attacking species on the number attacked. *Can. Ent.*, **91**: 129-144.

(Recepción: 20 diciembre 1999)

(Aceptación: 29 septiembre 2000)