

Modelo bioeconómico para *Digitaria sanguinalis* (L) Scop. en cultivo de soja transgénica de la Pampa Ondulada (Argentina) y simulación de estrategias de control

F. H. OREJA, J. L. GONZÁLEZ-ANDÚJAR

El trabajo describe el desarrollo de un modelo bioeconómico para *Digitaria sanguinalis* en el cultivo de soja transgénica y su uso para simular diferentes estrategias de control. Se consideraron cinco estrategias de control: Una testigo y otras cuatro basadas en el uso de glifosato para controlar una o las dos cohortes que presenta *D. sanguinalis* en su ciclo biológico. En ausencia de medidas de control *D. sanguinalis* crece siguiendo una curva hiperbólica hasta alcanzar una población de 12079 semillas m⁻². La estrategia que considera un control del 100% de las dos cohortes mostró los mejores rendimientos económicos y fue la única capaz de reducir la población a medio plazo. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del modelo, destacándose la influencia de la pérdida de semillas sobre los resultados del modelo.

F. H. OREJA. Dep. de Producción Vegetal, Fac. de Agronomía, Univ. de Buenos Aires, Av. San Martín 4453, (1417) Buenos Aires, Argentina.

J. L. GONZÁLEZ-ANDÚJAR. Instituto de Agricultura Sostenible (C.S.I.C.), Alameda del Obispo, Apto. 4080, (14080). Córdoba, Spain. Email: andujar@cica.es.

Palabras clave: *Pasto cuaresma*, dinámica de poblaciones, glifosato, competencia, análisis de sensibilidad.

INTRODUCCIÓN

El pasto cuaresma (*Digitaria sanguinalis*) es considerada una de las 10 malas hierbas más problemáticas de la Argentina (MITIDIERI, 1981), especialmente en cultivos de maíz y soja de La Pampa Ondulada bajo siembra directa (DE LA FUENTE *et al.*, 2006; TUESCA *et al.*, 2001). El cultivo de soja, ocasiona importantes pérdidas de rendimiento, sobre todo cuando emerge durante los estados tempranos del cultivo (LEGUIZAMÓN, 1976). Incluso con la adopción de técnicas como la siembra directa, el uso de cultivares transgénicos y herbicidas totales, esta mala hierba se ha mantenido o aumentado su presencia (TUESCA *et al.*, 2001, CULPEPPER *et al.*, 2001).

La demografía del pasto cuaresma en cultivos de soja resistente a glifosato ha sido estudiada en un trabajo previo (OREJA y DE LA FUENTE, 2005), sin embargo no se ha elaborado ningún tipo de modelo que permita un estudio de su dinámica de poblaciones a medio y largo plazo, así como la evaluación económica de estrategias de control.

El objetivo de este trabajo es la construcción de un modelo bioeconómico para *D. sanguinalis* en el cultivo de soja resistente a glifosato que permita evaluar económicamente diferentes estrategias de control.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología seguida para el desarrollo del modelo Bioeconómico se basa en el tra-

bajo desarrollado por GONZÁLEZ-ANDÚJAR y FERNÁNDEZ-QUINTANILLA (1993) pero ampliándolo para considerar dos cohortes poblacionales. Una cohorte, que emerge a finales de noviembre y una segunda cohorte que emerge a finales de diciembre. El modelo consiste en la integración de tres submodelos: a) demográfico, b) de competencia con el cultivo y c) económico.

Submodelo demográfico

Emergencia de plántulas:

El número de plántulas (P , plántulas m^{-2}) que emergen en el año t para cada cohorte (i) está dado por:

$$P_{t,i} = BS_{t,i} e_i \quad (1)$$

donde e es la proporción de plántulas que emergen a partir del banco de semillas (BS) en el tiempo t para cada una de las cohortes ($i = 1, 2$).

Supervivencia de las plántulas:

El número de plántulas que sobreviven y llegan al estado de planta adulta (A , plantas adultas m^{-2}) en el tiempo t fue modelizado por:

$$A_{t,i} = P_{t,i} / (1 + aP_{t,i}) \quad (i=1,2) \quad (2)$$

donde a_i es la recíproca del valor asintótico de A para la cohorte i ($i=1,2$).

Si c representa la proporción de plantas de *D. sanguinalis* que son muertas por la aplicación de glifosato, la ecuación (2) queda:

$$A_{t,i} = (1-c)P_{t,i} / (1 + aP_{t,i}) \quad (i=1,2) \quad (3)$$

Producción total de semillas:

Un incremento de la densidad de plantas adultas implica una reducción de la fecundidad como consecuencia de un proceso dependiente de la densidad. El proceso puede ser modelizado con la siguiente ecuación:

$$S_{t,i} = f_i A_{t,i} / (1 + b_i A_{t,i}) \quad (i=1,2) \quad (4)$$

donde S es la producción total de semillas m^{-2} en el tiempo t , f es la fecundidad (semillas planta $^{-1}$) de una planta aislada y b es una parámetros.

Lluvia de semillas:

Una vez producidas las semillas, éstas pueden ser consumidas por predadores, recolectada con la cosecha, etc. Por lo tanto, el total de semillas que llega al banco de semillas (L , semillas m^{-2}) en el tiempo t estará dado por:

$$L_t = S_t (1 - p) \quad (5)$$

donde p representa la proporción de semillas perdidas.

Banco de semilla:

El tamaño del banco de semillas para un año dado (BS , semillas m^{-2}) es el resultado de las semillas que sobreviven en el suelo mas las que se incorporan a través de la lluvia de semillas. Así, el tamaño total del banco de semillas en el tiempo $t+1$ queda determinado por:

$$BS_{t+1} = BS_t (1 - e_1) (1 - e_2) (1 - m) + L_t \quad (6)$$

donde m es la mortalidad del banco de semillas. Puesto que no existe una estimación de este valor hemos tomado el valor existente en la literatura para *Digitaria ciliaris* (HIROYUKI y ATSUSHI, 2005) esta especie de *Digitaria* es muy similar *D. sanguinalis* (Gleason y Cronquist, 1991).

Submodelo de competencia con el cultivo

En el sub-modelo de competencia, la relación entre las plantas adultas totales de *D. sanguinalis* AT_t (plantas/ m^2) y el rendimiento del cultivo R_t (kg/ha) ha sido modelizada con la ecuación (OREJA y GONZÁLEZ-ANDÚJAR, 2007):

$$R_t = a \exp(-b AT_t) \quad (7)$$

donde $AT = \sum A_i$ ($i=1,2$), a es el máximo rendimiento del cultivo en ausencia de plantas de la mala hierba y b es un parámetro.

Submodelo económico

En el sub-modelo económico, el ingreso neto IN_t (US\$/ha) esperado para una determinada alternativa de control de *D. sanguinalis* está dado por:

$$IN_t = (P_{soja} * R_t) - CF - CH \quad (8)$$

donde P_{ja} es el precio de la soja en dólares por tonelada (US\$/tn), CF (US\$/ha) son los costos que no dependen del control de la mala hierba como son laboreos, semilla, fertilizantes, etc. y CH (US\$/ha) son los costos dependientes del control de la mala hierba, estos comprenden la aplicación del herbicida y el costo de la misma.

Parámetros del modelo y condiciones iniciales

Los valores de los distintos parámetros utilizados en el presente trabajo (Cuadro 1) fueron obtenidos a partir del trabajo de OREJA y DE LA FUENTE (2005).

Los parámetros de las ecuaciones 2 y 4 fueron ajustados a datos disponibles (no publicados) con el programa de regresión no lineal del paquete estadístico Prisma Graph-Pad 4. Los parámetros de la ecuación 7 fueron obtenidos del trabajo de OREJA y GONZÁLEZ-ANDÚJAR (2007) ($a= 3157 \text{ kg ha}^{-1}$ y $b=0.45$).

En el submodelo económico se estimó un total de costes fijos (CF) de 127 US\$/ha y un coste de control (CH) de 13 US\$/ha.

Todas las simulaciones realizadas se hicieron para un período de 10 años, tiempo suficiente para estabilizar las poblaciones, y se consideró un banco inicial de 100 semillas m^{-2} .

Estrategias de control

Se consideraron las siguientes cinco estrategias: a) Estrategia sin control o testigo (tratamiento T1), b) un control del 100% de la primera cohorte y sin control en la segunda cohorte (tratamiento T2), para representar la situación de la zona, en que se realiza una única aplicación del herbicida en estadios tempranos del cultivo y no se tiene en cuenta a la segunda cohorte, c) un control del 75% en la primera cohorte y del 67% de la segunda cohorte (tratamiento T3), d) con un 98% de control de la primera cohorte y un 100% de control de las plantas de la segunda cohorte (Tratamiento T4) y e) un control del 100% de las dos cohortes de la mala hierba (Tratamiento T5).

Cuadro 1. Valores de los parámetros utilizados en la simulación y análisis de sensibilidad.

Parámetro	Valor	Coeficiente de Sensibilidad	
Sub-modelo demográfico			
<i>Emergencia cohorte 1 e1</i>	0,29	-40%	+40%
<i>Emergencia cohorte 2 e2</i>	0,14	0,09	-0,07
<i>Parámetro de supervivencia, cohorte 1 a1</i>	0,003	0,39	-0,30
<i>Parámetro de supervivencia, cohorte 2 a2</i>	0,20	0,01	-0,01
<i>Fecundidad cohorte 1 f1 (semillas/planta)</i>	5056	-0,99	0,99
<i>Fecundidad cohorte 2 f2 (semillas/planta)</i>	100	-0,01	0,01
<i>Pérdida de semillas p</i>	0,73	2,69	-2,64
<i>Mortalidad de semillas en el suelo m</i>	0,46	0,48	-0,35
Sub-modelo competencia			
<i>Fecundidad cohorte 1 f1 (semillas/planta)</i>	5056	-0,04	-0,02
<i>Pérdida de semillas p</i>	0,46	0,03	32,2
Sub-modelo económico			
<i>Precio soja P (US\$/tn)</i>	124	0,24	0,24
<i>Costos Herbicidas HC (US\$/ha)</i>	13	-0,12	0,12
<i>Costos Fijos FC (US\$/ha)</i>	10	-1,13	1,13
<i>Fecundidad f1 (semillas/planta)</i>	5056	0,01	0,00
<i>Pérdida de semillas p</i>	0,46	-0,01	7,81

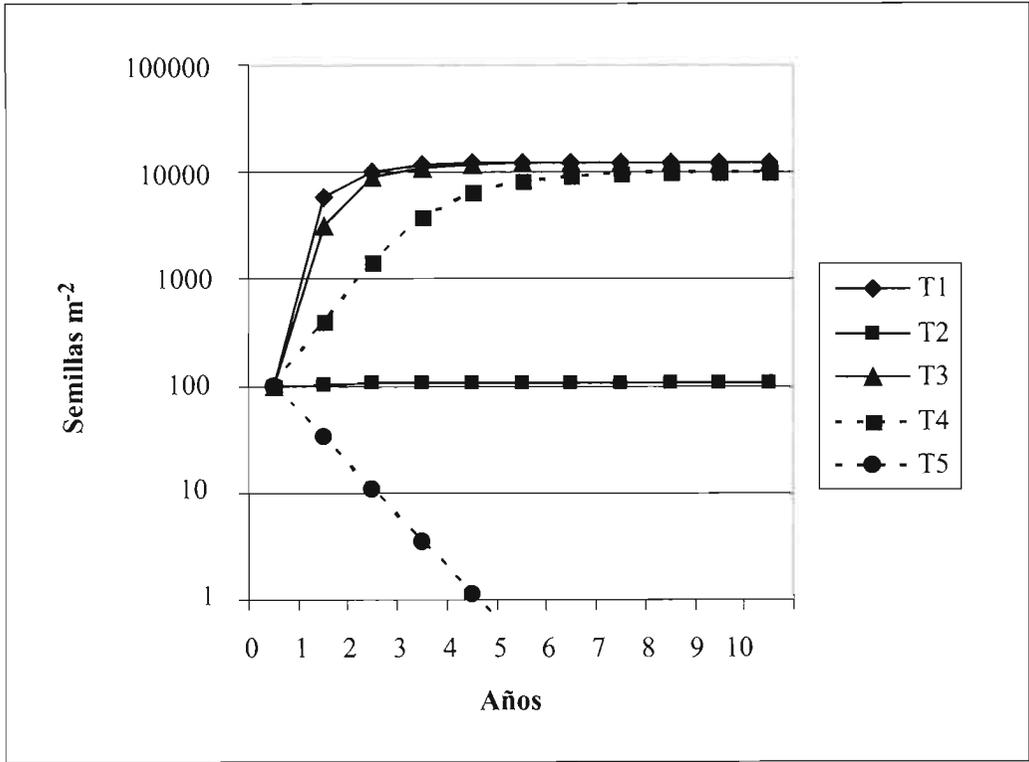


Figura 1. Evolución del banco de semillas del suelo de *Digitaria sanguinalis* bajo diferentes niveles de control con glifosato: sin control (T1); 100% control de la 1ª cohorte y 0% de la 2ª cohorte (T2); 75% de la 1ª cohorte y 67% de la 2ª cohorte (T3); 98% de la 1ª cohorte y 100% de la 2ª cohorte (T4); 100 % de control en ambas cohortes (T5).

Análisis de sensibilidad de los parámetros

Con el objetivo de establecer el efecto de la variabilidad de los parámetros del modelo sobre el resultado se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, el cual es definido como la proporción en que varía el resultado de la variable considerada (banco de semillas, rendimiento del cultivo o ingreso neto) en función de la proporción de lo que varía el parámetro a evaluar (GONZÁLEZ-ANDUJAR y FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, 1991). El coeficiente de sensibilidad se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$\frac{(\Delta \text{salida del modelo} / \text{salida del modelo})}{(\Delta \text{parámetro} / \text{parámetro})}$$

Se modificó un $\pm 40\%$ el valor de cada uno de los parámetros más relevantes (cuadro 1), considerado suficiente para representar la posible variación en los parámetros en condiciones reales.

Si el valor del coeficiente de sensibilidad es grande, indica que una pequeña variación en el parámetro evaluado ocasiona una gran variación en la salida del modelo.

RESULTADOS

Análisis de sensibilidad

Para el sub-modelo demográfico los procesos más sensibles a las variaciones son la fecundidad de la primera cohorte (f_1) y la pérdida de semillas (p) (cuadro 1). Sensibilidad ante la pérdida de semillas (p) también muestra-

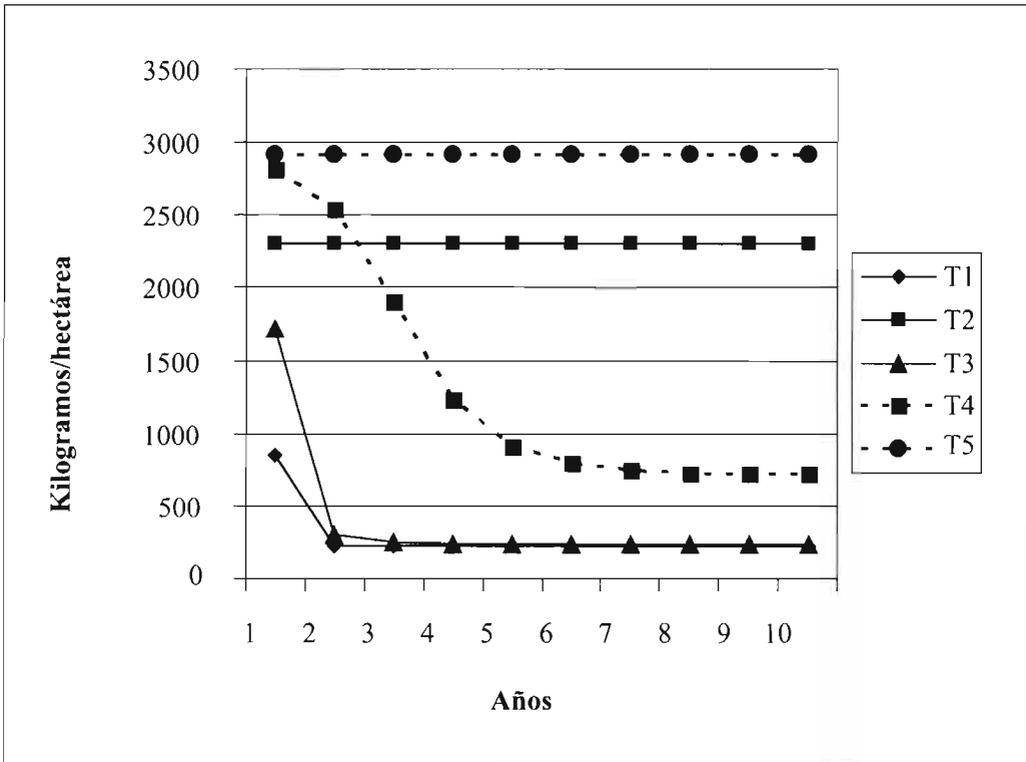


Figura 2. Efecto de los distintos niveles de control químico sobre *Digitaria sanguinalis* en el rendimiento del cultivo de soja un período de 10 años: sin control (T1); 100% control de la 1ª cohorte y 0% de la 2ª cohorte (T2); 75% de la 1ª cohorte y 67% de la 2ª cohorte (T3); 98% de la 1ª cohorte y 100% de la 2ª cohorte (T4); 100 % de control en ambas cohortes (T5).

ron los modelos económico y de competencia, de los cuales el primero también mostró sensibilidad ante los costos fijos (*CF*) (cuadro 1).

Simulación de estrategias de control

Cuando no se realiza ningún control de la mala hierba el banco de semillas crece siguiendo una curva hiperbólica (Fig. 2), alcanzando la población de equilibrio alrededor del quinto año con una densidad de 12079 semillas m⁻² (Tratamiento T1), momento en el que el cultivo sufre una caída de rendimiento del 92% comparado con el rendimiento del cultivo sin infestación (Fig. 3), y el ingreso anual neto se hace negativo.

A lo largo de 10 años si se logra un 100% de control de la primera cohorte y no se con-

trola la segunda cohorte (T2) la población prácticamente se mantiene en los niveles iniciales de infestación, alcanzando un valor de equilibrio de 107 semillas m⁻² (Figura 1), y en este estrategia el rendimiento de la soja es un 21% inferior comparado con un control del 100% de ambas cohortes, y el ingreso neto anual cae un 30% con valores negativos (Fig. 3).

Cuando el glifosato se aplica tardíamente (en estado R1, del cultivo) y controla un 75% de la primera cohorte y un 67% de la segunda cohorte (OREJA y DE LA FUENTE, 2005) (T3), el comportamiento es similar a cuando no se realiza control pues se alcanza una población de equilibrio al tercer año de 11078 semillas m⁻² (Fig. 1) y el rendi-

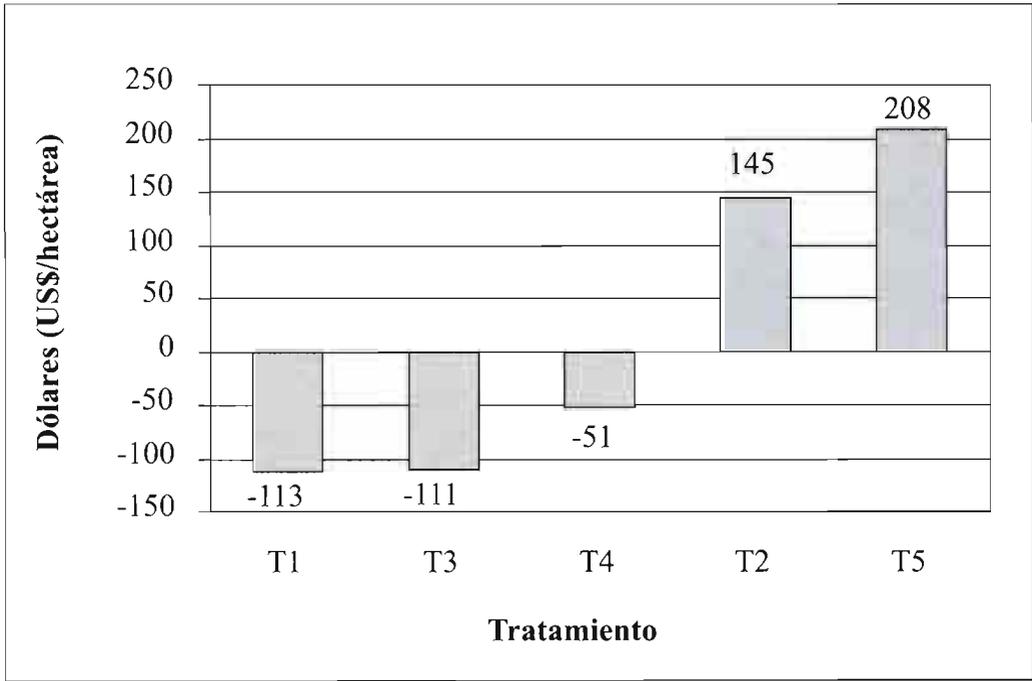


Figura 3. Efecto de los distintos niveles de control químico sobre *Digitaria sanguinalis* en el ingreso neto anual del cultivo de soja al término de 10 años: sin control (T1); 100% control de la 1ª cohorte y 0% de la 2ª cohorte (T2); 75% de la 1ª cohorte y 67% de la 2ª cohorte (T3); 98% de la 1ª cohorte y 100% de la 2ª cohorte (T4); 100 % de control en ambas cohortes (T5).

miento del cultivo es de tan solo 236 kg/ha (Fig. 2), produciendo un ingreso neto anual negativo (Fig. 3). Cuando se aplica la estrategia T4 y se controla a primera cohorte en un 98% y el de la segunda cohorte en un 100%, no se consigue controlar la población que se ve incrementada hasta alcanzar una población de equilibrio a los 6 años de 9280 semillas m^{-2} , un 18% inferior a la población de equilibrio alcanzada en ausencia de control. Con esta población el rendimiento de la soja es de 793 kg/ha y el ingreso neto anual negativo de $-51 \$ ha^{-1}$ (Fig. 2 y 3).

El desherbado total de ambas cohortes (T5) controla efectivamente la población en un período de 5 años (Fig. 2), produciendo los niveles más altos de producción y un rendimiento económico positivo de 208 US\$ ha^{-1} (Fig. 2 y 3).

DISCUSIÓN

El trabajo ha consistido en explorar la evolución de la *D. sanguinalis* desde un punto de vista biológico y económico. El modelo considera las dos cohortes observadas en campo (OREJA y DE LA FUENTE, 2005), si bien la práctica habitual es controlar únicamente la primera de ellas. Como era de esperar, en ausencia de control la población crece hasta llegar a su capacidad de carga en el cultivo de soja (12079 semillas m^{-2}), produciendo grandes pérdidas de producción y económicas (Fig. 1, 2 y 3).

A pesar de que la segunda cohorte tiene muy poca incidencia tanto sea en el aporte de semillas como en la competencia que ejerce sobre el cultivo, esta cohorte por sí sola puede hacer que la población mantenga los niveles de infestación a pesar de obtener un control

del 100% sobre la primera cohorte (T2) y ejercer una competencia tal que el rendimiento del cultivo disminuye un 21%, con lo cual el ingreso neto cae un 30% (Fig. 2 y 3). Si bien el resultado económico es positivo.

Una posible estrategia para controlar ambas cohortes con una sola aplicación sería un retraso en la aplicación del herbicida, hasta el estado R1 del cultivo (FEHR, 1971), con ello se obtiene una eficacia de control del 75% en las plantas de la primera cohorte y del 67% de las plantas de la segunda cohorte (T3) (OREJA y DE LA FUENTE, 2005). Sin embargo, esta estrategia no es suficiente para controlar la población ya que permite a la población crecer hasta valores de 11078 semillas m^{-2} con pérdidas en el rendimiento y con un ingreso neto anual negativo (Fig. 1, 2 y 3). Este resultado confirma lo indicado por LEGUIZAMÓN (1976), que un retraso en el control de las malas hierbas en el cultivo de soja ocasionan graves pérdidas de rendimiento.

Las otras estrategias estudiadas contemplan el uso de dos aplicaciones de herbicida para controlar ambas cohortes. La aplicación de un 98% de control en la primera cohorte y un 100% de control a la segunda cohorte (T4) no es suficiente para evitar el crecimiento de la población, produciendo unos resultados económicos negativos (Fig. 3). Parece claro que hay que conseguir un control del 100% o superior al 98% de ambas cohortes como muestra la simulación de la estrategia T5 para conseguir una reducción efectiva del pasto

cuaresma. Dicha estrategia produce los valores económicos más altos (Fig. 3) y es claramente superior a la estrategia utilizada comúnmente en la Pampa Ondulada (T2), produciendo un 43% más de beneficios.

El análisis de sensibilidad muestra que el modelo es especialmente sensible a la pérdida de semillas, comportamiento similar en otros modelos (e.j. GONZÁLEZ-ANDÚJAR y FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, 1993) por lo que sería conveniente la realización de experimentos de campo que cuantificasen lo más exactamente posible el valor de este parámetro. Es preciso señalar la poca sensibilidad del modelo al coste del herbicida (Cuadro 1), incluso a un incremento del mismo del 40%, lo cual es importante cuando las estrategias que se estudian están basadas en el uso de glifosato.

Nuestro trabajo concluye con la necesidad de controlar ambas cohortes, ya que si bien, como hemos indicado anteriormente, la segunda cohorte no tiene una gran relevancia, debido a la alta fecundidad de *D. sanguinalis*, la ausencia de su control produce un incremento de la población a medio plazo con la consiguiente reducción de la producción y del rendimiento económico.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Carolina por su beca de Formación Permanente. A Pilar Castro, Dr. Leguizamón y Dr. Tucsca por su ayuda en la realización del trabajo.

ABSTRACT

OREJA F. H., J. L. GONZÁLEZ-ANDÚJAR. 2007. Modelling the population dynamics of *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. in transgenic soybean crops in Rolling Pampas (Argentina) and simulation of control strategies. *Bol. San. Veg. Plagas*, 33: 419-426.

A bioeconomical model for *Digitaria sanguinalis* is described and used to simulate different control strategies in transgenic soybean crop. Five strategies of control were considered: A control strategies and other four based in the use of Glifosato to control one or two cohorts that presents *D. sanguinalis* in its life cycle. In absence of measures of control *D. sanguinalis* grows following a hyperbolic curve until reaching a population of 12079 seeds m^{-2} . The strategy that considers a control of the 100% of both cohorts showed the best economic result and was only the able one to reduce the population in the mid-term. An analysis of sensitivity of the model was carried out, standing out the influence of the loss of seeds on the results of the model.

Key words: Large crabgrass, population dynamics, glyphosate, competition, sensitivity analysis.

REFERENCIAS

- CULPEPPER, A. S., GIMENEZ, A. E., YORK, A. C., BATTS, R. B., WILCUT, J. W. 2001. Morningglory (*Ipomoea* spp.) and Large Crabgrass (*Digitaria sanguinalis*) control with glyphosate and 2,4-DB mixtures in glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*, **15** (1): 56-61.
- DE LA FUENTE, E. B., SUÁREZ, S. A., GHERSA, C. M. 2006. Soybean weed community composition and richness between 1995 and 2003 in the Rolling Pampas (Argentina). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **115** (1-4): 229-236.
- FEHR, W., CAVINESS, C., BURMOOD, D., PENNINGTON, J. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, **11**: 929-931.
- GLEASON, A., CRONQUIST, A. 1991. *Manual of Vascular Plants of Northeastern United States and Adjacent Canada*. Second Edition. New York, USA: New York Botanical Garden.
- GONZÁLEZ-ANDÚJAR, J. L., FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. 1991. Modeling the population dynamics of *Avena sterilis* under dry-land cereal cropping systems. *Journal of Applied Ecology*, **28**(1):16-27.
- GONZÁLEZ-ANDÚJAR, J. L., FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. 1993. Strategies for the control of *Avena sterilis* in winter wheat production systems in central Spain. *Crop Protection*, **12** (8): 617-623.
- HIROYUKI, K., ATSUSHI, O. 2005. *Digitaria ciliaris* seed-banks in untilled and tilled soybean fields. *Weed Biology and Management*, **5**: 53-61.
- LEGUIZAMÓN, E. 1976. Competencia de mala hierbas con soja: efectos sobre el crecimiento y el rendimiento. Actas IV Reunión Técnica Nacional de Soja. Miramar (Buenos Aires).
- MITIDIERI, A. 1981. El problema de las mala hierbas en soja y su control en Argentina. Actas IV Conferencia Mundial de Investigación en soja. Buenos Aires, **4**: 1657-1664.
- OREJA, F. H., DE LA FUENTE E. B. 2005. Dinámica Poblacional del pasto cuaresma (*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.) en cultivos de soja de La Pampa Ondulada. XVII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM) y I Congreso Iberoamericano de ciencia de las mala hierbas. Cuba. 767-771.
- OREJA, F. H., GONZÁLEZ-ANDÚJAR, J. L. 2007. Modelling competition between large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*) and glyphosate-resistant soybean in Rolling Pampas. *Communication in Biometry and Crop Science*, **2**: 62-67.
- TUESCA, D., PURICELLI, E., PAPA, J. C. 2001. A long-term study of weed flora shifts in different tillage systems. *Weed Research*, **41**: 369-382.

(Recepción: 27 febrero 2007)

(Aceptación: 5 junio 2007)