

## **Modelo bioeconómico para el control óptimo de la invasora *Zea mays ssp. mexicana ad. int.* en España**

MARTÍNEZ Y<sup>1\*</sup>, CIRUJEDA A<sup>2</sup>, GÓMEZ MÍ<sup>3</sup>, MARÍ AI<sup>4</sup>, PARDO G<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Análisis Económico, Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (Univ. de Zaragoza-CITA), Gran Vía 2-4, 50004 Zaragoza, ESPAÑA.

[\\*yolandam@unizar.es](mailto:*yolandam@unizar.es)

<sup>2</sup>Departamento de Sanidad Vegetal, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón-IA2 (CITA-Univ. de Zaragoza), Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza, ESPAÑA.

[acirujeda@aragon.es](mailto:acirujeda@aragon.es), [gpardos@aragon.es](mailto:gpardos@aragon.es)

<sup>3</sup>Charles H. Dyson School of Applied Economics & Management, Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA.

[mig7@cornell.edu](mailto:mig7@cornell.edu)

<sup>3</sup>Departamento de Sanidad Vegetal, Grupo de Gestión Integrada, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza, ESPAÑA.

[aimari@aragon.es](mailto:aimari@aragon.es)

**Resumen:** El objetivo de este trabajo fue identificar la secuencia de estrategias de control que minimizan los costes privados y sociales en el control de la especie invasora teosinte, recientemente aparecida en campos de maíz del noreste de España. Para ello se ha construido un modelo bio-económico dinámico que combina parámetros biológicos obtenidos en tres años de experimentos, realizados para conocer la biología de la planta en las condiciones de Aragón, y datos de costes e ingresos recopilados en las zonas afectadas considerando dos niveles de infestación inicial: baja (10 plantas/ha) y alta (1000 plantas/ha). Los resultados muestran que las pérdidas económicas pueden alcanzar 9229 y 9398 €/ha para los escenarios de baja y alta infestación si no se toman medidas de control de las infestaciones en un horizonte de planificación de 15 años. Además, se muestra que las estrategias óptimas desde el punto de vista privado y social son diferentes. El modelo indica que la falsa siembra y el control manual no son estrategias óptimas si se consideran los costes sociales de control de la invasora.

**Palabras clave:** Programación dinámica, manejo de malas hierbas, estrategias de control, impacto económico, costes públicos.

### **1. Introducción**

Teosinte (*Zea mays* L.) es una especie invasora, ancestro del maíz, que ha aparecido recientemente como mala hierba en los campos de maíz del noreste de España. Su presencia supone una seria competencia para el maíz por varias razones: es capaz de producir una gran cantidad de semillas que permanecen viables en el suelo durante varios

años, puede hibridarse con el maíz y tiene un ciclo de crecimiento similar, por lo que el control con herbicidas en este cultivo no es posible. Estas características, junto con el hecho de que el monocultivo de maíz es muy común en las zonas afectadas, propician que la invasora tenga una elevada capacidad de propagación. Las potenciales pérdidas de producción y costes económicos causados por esta invasora han generado gran preocupación a los agricultores y a los responsables de sanidad vegetal en las zonas afectadas.

El objetivo de este trabajo es construir un modelo bio-económico dinámico para identificar las estrategias de maximización de beneficios para los agricultores y diseñar políticas para gestionar el teosinte en las zonas afectadas. En este contexto el modelo dinámico se utiliza para comparar estrategias óptimas en dos escenarios: 1) cuando un agricultor individual maximiza sus beneficios privados y 2) cuando un regulador maximiza los beneficios sociales (es decir, los beneficios para los agricultores menos los costes públicos resultantes de los controles necesarios para manejar las infestaciones de teosinte). Esta comparación contribuye a una mejor comprensión de las estrategias más adecuadas para la erradicación de la especie invasora y aporta una evaluación económica de sus consecuencias.

## **2. Material y Métodos**

Los primeros informes de la presencia de teosinte se recibieron en agosto de 2014 en el Centro de Sanidad y Certificación Vegetal de Aragón (CSCV). Varios ensayos experimentales se han llevado a cabo desde 2014 a 2017 para investigar la biología del teosinte bajo las condiciones de Aragón, cuyos resultados se han empleado en la determinación de la dinámica de crecimiento de la población de la invasora que se incorporan en el modelo bio-económico (Cirujeda et al. 2017, Prado et al. 2017).

Se consideran dos perspectivas diferentes a través de sendos modelos: 1) el agricultor individual selecciona las estrategias de control maximizando sus beneficios privados en una parcela media de 8 ha y suponiendo que se permite el monocultivo de maíz; y 2) Un planificador social (CSCV) selecciona las estrategias que minimizan los costes sociales agregados en las parcelas infestadas (400 ha), es decir, los costes privados de las áreas con infestación (pérdida de beneficios privados por la presencia de teosinte), más los costes públicos en que incurre el planificador social (inspección, investigación, divulgación). Además, en este segundo modelo, se prohíbe el monocultivo de maíz. Seguidamente, se comparan y contrastan las estrategias de control óptimas del agricultor y del planificador social en un horizonte temporal de 15 años para evaluar la idoneidad de las medidas reglamentarias introducidas por la CSCV para controlar teosinte.

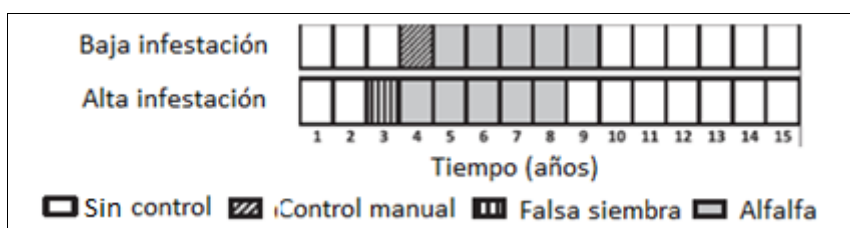
De acuerdo con la información recopilada en las áreas afectadas, los modelos incluyen dos grados de incidencia de infestación: baja (10 plantas/ha) y alta infestación (1000 plantas/ha). Las estrategias de control consideradas son: 1.Sin control; 2.Falsa siembra; 3.Control manual; 4.Rotación cebada-girasol; 5. Rotación guisante-girasol; 6.Rotación

alfalfa-trigo; 7. Alfalfa. Los modelos se resolvieron utilizando el algoritmo CONOPT2 del programa GAMS (General Algebraic Modeling System, Brooke et al., 1998).

### 3. Resultados y Discusión

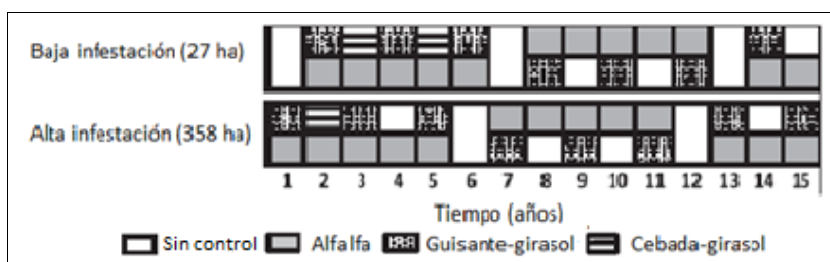
La figura 1 muestra la senda de estrategias óptimas privadas para un agricultor con baja y alta infestación en el horizonte de planificación considerado. Los resultados muestran que los agricultores con bajas infestaciones no hacen ningún control en los 3 primeros años y después realizan un control manual el año 4. Posteriormente el maíz es sustituido por el cultivo de alfalfa durante los 5 siguientes años para volver al monocultivo de maíz en el año 10. Por el contrario, los agricultores con altas infestaciones seleccionan no controlar los 2 primeros años, la falsa siembra en el año 3 y la alfalfa los siguientes 5 años, retomando el monocultivo de maíz en el año 9.

Figura 1: Estrategias de control óptimas en el modelo individual



La figura 2 muestra la senda de estrategias óptimas para el regulador social. En este caso el modelo sugiere que las rotaciones deberían adoptarse en el segundo año con bajas infestaciones y en el primer año con altas infestaciones. Posteriormente en la mitad del área total con baja infestación se cultivaría alfalfa, mientras que en la otra mitad se haría una rotación cebada-girasol un año y guisante-girasol el año siguiente hasta llegar al año 7 en que podría retomarse el cultivo de maíz. A partir del año 8, lo óptimo es rotar cebada-girasol y maíz en la mitad del área y mantener alfalfa en la otra mitad. Por tanto, una primera conclusión de los resultados es que el control manual y la falsa siembra no son estrategias adecuadas para la erradicación de la invasora desde el punto de vista social, puesto que implican costes públicos que el agricultor no toma en cuenta y deberían considerarse en la toma de decisiones.

Figura 2: Estrategias de control óptimas en el modelo social



Finalmente, en la tabla 1 se han calculado los beneficios totales y por hectárea en el área afectada en tres posibles situaciones: i) sin hacer ningún control; ii) siguiendo las estrategias óptimas privadas; iii) siguiendo las estrategias óptimas sociales.

Los resultados del modelo muestran que, si no se realiza ningún control, entonces la producción de maíz se perdería completamente en el cuarto periodo (si se parte de una parcela con baja infestación) o en el tercero (si se parte de alta infestación) debido a la competencia de teosinte. En ese caso los beneficios privados serían de 105,3 y 943,2 miles de € en las áreas de baja y alta infestación, respectivamente, y un coste público de 78,4 y 745,8 miles de €. Por tanto, las pérdidas para todo el horizonte temporal considerado alcanzarían 7709 miles de € si no se hace nada para controlar teosinte. La adopción de las estrategias del modelo privado conlleva una pérdida de 2256 miles de € en toda el área afectada respecto a la situación sin infestación, mientras que con las estrategias del modelo social la pérdida sería de 4095 miles de €. La pérdida de beneficios, por tanto, respecto a la situación sin infestación es alrededor de un 24% si se tiene baja infestación o de un 27% si se tiene alta infestación si se adoptan las estrategias privadas óptimas, mientras que la pérdida aumenta a 49% o 52% si se adoptan las socialmente óptimas, que implican la adopción obligatoria de rotaciones. Esto explica, en primer lugar, por qué los agricultores no rotan cultivos si no se les obliga.

No obstante, si se tienen en cuenta los costes públicos asociados a las estrategias de control de teosinte seleccionadas en cada caso, los cálculos muestran que las estrategias socialmente óptimas reducen estos costes considerablemente, pasando de 170.096 € con las estrategias privadas a menos de 5.200 €. Por tanto, si se consideran todos los costes derivados del control de teosinte (privados y públicos), entonces las estrategias óptimas privadas reducen el beneficio en un 28,8% respecto a la situación sin infestación, mientras que las estrategias sociales lo reducen en un 27,7%.

Tabla 1. Impactos económicos estimados.

	Beneficio total actualizado (en 10 <sup>3</sup> €)		
	<i>(Beneficio anual medio en €/ha)</i>		
	Sin control	Óptimo privado	Óptimo social (sin monocultivo)
Beneficios sin infestación	7933 (1374)	7933 (1374)	5314 (920)
Beneficio infestación baja (27 ha)	105,3 (260)	424,3 (1048)	281,3 (695)
Costes públicos (infestación baja)	78,4 (193,6)	20,9 (51,6)	5,1 (12,9)
Beneficio infestación alta (358 ha)	943,2 (175,6)	5423 (1010)	3562 (663)
Costes públicos (infestación alta)	745,8 (138,8)	149,2 (27,8)	0 (0)
Pérdidas respecto a no infestación	7709 (1271)	2256 (391)	4095 (709)

La comparación de las estrategias óptimas privadas vs. sociales permite explicar el comportamiento de los agricultores observado en las parcelas infestadas con bajos niveles de infestación de las parcelas, pues tienden a no tomar medidas de control debido a la alta rentabilidad del maíz y al desconocimiento de la alta capacidad de teosinte para competir con el maíz. Las rotaciones solo se adoptan cuando teosinte alcanza niveles altos de infestación. No obstante, este comportamiento no tiene en cuenta los costes que se generan al conjunto de la sociedad (en forma de costes públicos) y por tanto no son óptimos socialmente.

La información obtenida a través de los ensayos experimentales, combinada con los datos económicos recopilados en las zonas demuestran que la erradicación de teosinte solo es posible si se rotan cultivos diferentes al maíz y que ello puede lograrse en un periodo de tiempo relativamente corto (6 o 7 años) con una pérdida de beneficios totales de un 28% respecto a la situación sin infestación.

#### **4. Conclusiones**

El modelo bio-económico dinámico aporta información relevante para la erradicación de teosinte en las zonas afectadas, subrayando la importancia de que las infestaciones incipientes se controlen cuanto antes y mostrando que la adopción de rotaciones de cultivos es la única manera de erradicar la invasora, además de minimizar los costes de infestación.

#### **5. Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) [proyectos ERTA-2014-00011-C02 y RTA2017-00082-00-00] y por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad [proyecto ECO2016-75927-R], y a través de una Beca de la Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Co-Operative Research Programme: Biological Resource Management for Sustainable Agricultural Systems 2016.

#### **Referencias**

BROOKE A, KENDRICK D, MEERAUS A, RAMAN R (1998). GAMS Tutorial by R. Rosenthal. GAMS Development Corporation, Washington.

CIRUJEDA A, PARDO G, MARÍ AI, FUERTES S, AIBAR J (2017). Emergencia de teosinte en cultivos diferentes a maíz. In: XVI Congreso de la Sociedad Española de Malherbología, Pamplona.

PRADO C, CIRUJEDA A, PARDO G, MARÍ AI, FUERTES S, AIBAR J (2017). Profundidades máximas para la emergencia de teosinte. In: XVI Congreso de la Sociedad Española de Malherbología, Pamplona.

## **Bioeconomic model for optimal control of the invasive weed *Zea mays ssp. mexicana* in Spain**

**Summary:** Teosinte is an invasive weed which emerged recently in Northeastern Spain, an important corn-growing region in Western Europe. It is causing substantial agronomic and economic damages and is threatening the availability of corn in the region. Farmers and regulatory agencies can choose from a number of strategies to control for teosinte infestations including adoption of specific cultural practices such as manual control constructing false seedbeds, as well as adopting corn rotations with other annual and perennial crops. In spite of the potential negative impacts of this weed, little is known about what the optimal control strategies are, both from the private (e.g. the farm) and social (e.g. regulatory agencies) perspectives. In response, we develop a dynamic optimization model to identify the sequence of control strategies that minimize private and social costs under low- and high-infestation level scenarios, for a fifteen-year planning horizon. We calibrate the model using biological data from experimental trials and economic parameters collected from farmers in the region. Our results suggest the economic losses of teosinte infestation can reach up to 9229 and 9398 €/ha for low- and high-infestation scenarios if nothing is done to control it. In addition, results show that optimal private and social strategies are different. Results show false seedbed and manual controls, currently recommended by the regulatory agency in low-infestation cases, are not socially optimal.

**Keywords:** Dynamic programming, weed management, control strategies, economic impact, public costs.