

## Modelo de Simulación para el Manejo Integrado de Malezas: Análisis económico y medioambiental

Lucia Damiani<sup>1\*</sup>, Franco A. Molinari<sup>2,3</sup>, Aníbal M. Blanco<sup>1</sup>, Guillermo R. Chantre<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Planta Piloto de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (PLAPIQUI-CONICET), 8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, San Andrés 800, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

<sup>3</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC)

<sup>4</sup>Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS-CONICET), 8000 Bahía Blanca, Argentina

\*ldamiani@plapiqui.edu.ar

**Resumen.** El presente trabajo incorpora un análisis económico y medioambiental a un modelo matemático de simulación multianual de escenarios de Manejo Integrado de Malezas (*MIM*). Dicho modelo se encuentra parametrizado para simular la interacción competitiva de *Avena fatua L.* en competencia con trigo y cebada en el sudoeste bonaerense. El modelo permite simular diferentes estrategias de manejo sobre un período de cinco años. Se agrega el cálculo del margen bruto anual y el valor presente neto, a fin de establecer el resultado económico de cada año y estimar cómo cada uno repercute en la actualidad. Por otro lado, también se evalúa el impacto ambiental utilizando los índices *EIQ* y *RIPEST*. La metodología propuesta se aplicó a tres casos de manejo en sistemas de siembra directa típicos de la región semiárida templada Argentina.

**Palabras Claves:** modelado demográfico, MIM, impacto ambiental, Margen Bruto, Valor presente Neto.

### 1 Introducción

Desde las últimas décadas los herbicidas han sido el principal medio para el control de malezas en cultivos convencionales debido a su simplicidad de aplicación, efectividad y asequibilidad. No obstante, su uso ininterrumpido ha provocado efectos negativos a nivel ambiental, social y económico. En respuesta a esta realidad, se comenzó a desarrollar el Manejo Integrado de Malezas (*MIM*), que puede ser definido como un proceso de toma de decisiones que combina diferentes técnicas de prevención y control (culturales y mecánicas, químicas y biológicas) teniendo en cuenta información ambiental, biológica y ecológica tanto de los cultivos como de las malezas. Sin embargo, resulta desafiante determinar cuantitativamente los costos y beneficios de todas estas alternativas a fin de establecer cuáles son las más convenientes. Esta actividad puede verse beneficiada por el uso de modelos matemáticos de simulación. En el presente trabajo, se plantea continuar con la propuesta de [1] quienes desarrollaron una herramienta que

permite estimar los efectos de diferentes estrategias de control sobre la dinámica demográfica de una maleza anual (*Avena fatua* L.) en competencia con cereales de invierno (trigo y cebada) en un plan de rotación multianual. Para tal fin, el modelo propuesto por [1] será reproducido en el lenguaje de programación de código abierto Python<sup>1</sup>, y se le incorporó los módulos de evaluación económica e impacto ambiental con el objetivo de estimar tanto la rentabilidad como el impacto de las alternativas de manejo de malezas en el medio ambiente.

## 2 Simulación del sistema cultivo-maleza

A continuación, se presenta brevemente el modelo de simulación de cultivos trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) en competencia con la maleza avena negra (*Avena fatua* L.). Para mayor detalle consultar [1].

### 2.1 Modelo de Simulación de Cultivos

En la Fig. 1 se presenta un resumen gráfico de la secuencia de cálculo diario del modelo de simulación de cultivos. En primer lugar, se calculan los grados térmicos acumulados ( $TTA[^\circ\text{C}]$ ) (1) a partir de los grados térmicos diarios ( $GD[^\circ\text{C}]$ ). Con este dato, se determina la fecha de madurez fisiológica de cada cultivo ( $Fecha_{MF}$ ) cuando el valor de  $TTA$  supere el umbral de madurez fisiológica correspondiente (2). También, a partir del  $TTA$ , se determina el área foliar total ( $TPLA[m^2/m^2]$ ) para trigo (3) o cebada (4) a fin de establecer el factor de competencia del cultivo sobre la maleza ( $FC$ ) (5). Asimismo, se fija la susceptibilidad del cultivo ( $SC$ ) a la competencia inter-específica según el período crítico del cultivo ( $PCC$ ) (6), cuya fecha de inicio y finalización es suministrada por el usuario. Por último, al finalizar la campaña anual, se estima el rendimiento esperado del cultivo ( $RC[\%]$ ) (7) el cual depende de su rendimiento potencial ( $RP[ton/ha]$ ), de la densidad actual de siembra ( $DAC[plantas/m^2]$ ) respecto de la densidad de siembra estándar ( $DSE[plantas/m^2]$ ) y de dos variables relacionadas con el crecimiento de la maleza: la máxima pérdida de rendimiento (%) por malezas ( $MPRM$ ) y la densidad de malezas ( $DM[ind/m^2]$ ). La pérdida de rendimiento del cultivo depende, a su vez, de dos constantes ( $A$  y  $K$ ).

### 2.2 Modelo de Simulación de la maleza

El modelo demográfico de la maleza (*Avena fatua* L.) tiene en cuenta tres procesos básicos cuyos cálculos se detallan en la Fig. 2. A saber:

#### Producción de Semillas.

Se calcula anualmente a partir de la sumatoria de individuos pertenecientes a la  $cohorte_1$  (aquellos individuos que alcanzan el estado Reproductivo Avanzado (RA) antes del inicio del Período Crítico de Control (PCC)) y la  $cohorte_2$  (individuos que

---

<sup>1</sup> [www.python.org](http://www.python.org)

alcanzan el estado RA después del inicio del PCC). La fecundidad individual es cohorte-dependiente ( $Fecund_{cohorte_1} = 187$  y  $Fecund_{cohorte_2} = 19$  semillas/ind) según (8). La producción de semillas anual se estima como un valor porcentual referido a la máxima producción potencial de semillas ( $14500$  semillas/m<sup>2</sup>).

#### **Banco de Semillas.**

Representa el número de semillas en el banco del suelo ( $BS$ ) (9). El cálculo anual se realiza en base a la producción de semillas de los últimos tres años, considerando la proporción de semillas quiescentes ( $q$ ) que varía según el tiempo transcurrido desde la dispersión primaria (ej. al año de dispersadas  $q = 0.7$ , luego de dos años  $q = 0.2$ , tres años post-dispersión  $q = 0.1$ ). También se tienen en cuenta las pérdidas de semillas por predación al barbecho ( $lb = 0.2075$ ), por dispersión ( $ld = 0.67$ ) y por mortalidad natural ( $sm = 0.0732$ ).

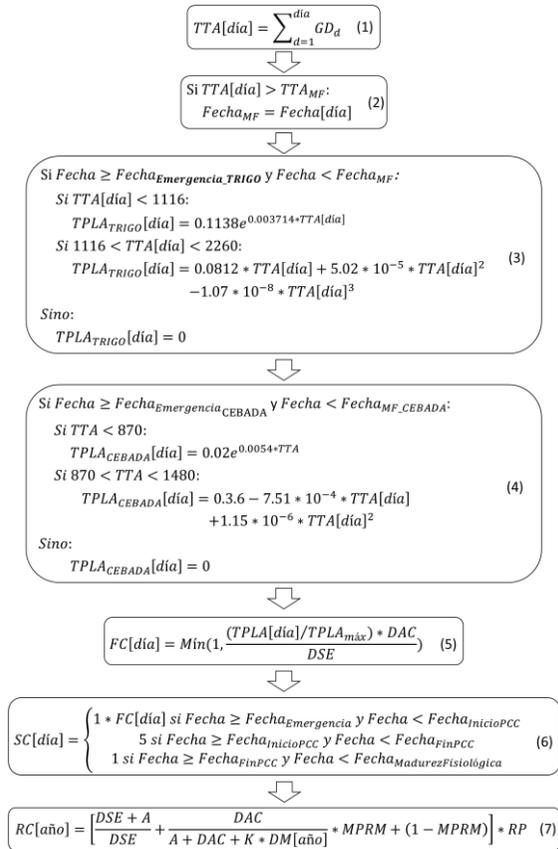
#### **Estados fenológicos de la maleza.**

El modelo calcula cohortes diarias teniendo en cuenta que la maleza atraviesa cinco estados fenológicos (EF): Plántula [P], Vegetativo Temprano [VT], Vegetativo Avanzado [VA], Reproductivo Inicial [RI] y Reproductivo Avanzado [RA]. El pasaje de un estado fenológico al siguiente ( $Pasaje[EF \rightarrow EF + 1]$ ) depende de la suma de tiempo térmico ( $P \rightarrow VT = 200$  °Cd,  $VT \rightarrow VA: 400$ °Cd,  $VA \rightarrow RI: 800$ °Cd y  $RI \rightarrow RA 600$ °Cd).

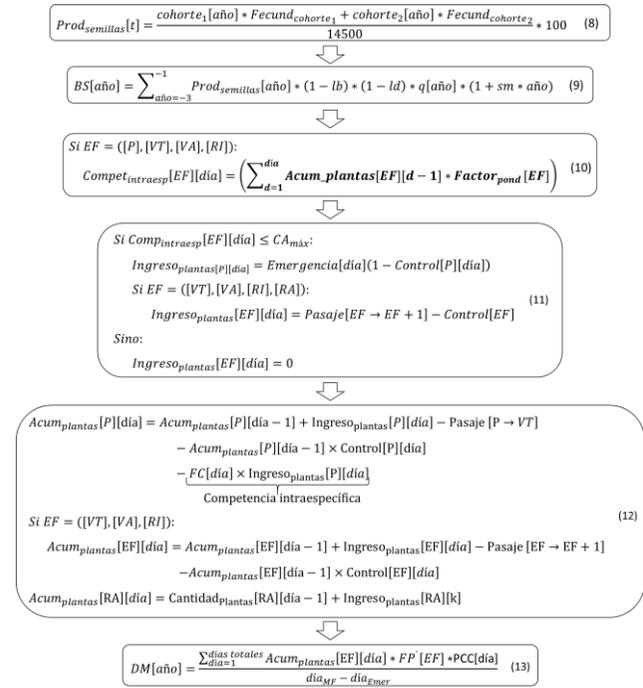
La competencia intra-específica ( $Comp_{intraesp}$ ) (10) se determina de acuerdo a la cantidad de individuos en cada estado fenológico por un factor de ponderación propio de cada uno de ellos (que representa el efecto competitivo intra-específico de cada EF).

El ingreso a cada EF (11) depende principalmente de si la competencia intra-específica es menor que la capacidad ambiental máxima ( $CA_{m\acute{a}x} = 250$ ). Ésta representa el número de individuos máximo de cada EF que soporta el agroecosistema y, por ende, condiciona la cantidad que pasa al siguiente estado fenológico. Asimismo, se cuantifica el control de malezas a través de un valor de efectividad asociado a cada estado fenológico específico ( $Control[EF]$ ), eliminando las cohortes diarias que resultan susceptibles al método implementado. El ingreso al estado de plántulas se calcula diferente al resto, debido a que se tiene en cuenta las semillas del banco que germinan ( $Emergencia$ ) y la competencia con el cultivo ( $Comp_{interesp}$ ).

Asimismo, se puede prever la cantidad de individuos de maleza acumulados en cada EF (12) y aquellos que llegan a fin de ciclo ( $DM[ind/m^2]$ ) (13). Esta 'competencia ponderada' que resulta de la sumatoria de individuos en cada estado fenológico ponderada por el efecto competitivo inter-específico de cada estado (factor competitivo ponderado,  $FP[P] = 0.15$ ;  $FP[VT] = 0.30$ ;  $FP[VA] = 0.60$ ;  $FP[RI] = 1$ ) es la que determina la pérdida de rendimiento del cultivo.



**Fig. 1.** Simulación del Cultivo.



**Fig. 2.** Simulación de la Maleza.

### 3 Evaluación económica y de impacto ambiental

En la presente contribución se incorpora al modelo de [1] dos módulos de cálculo adicionales: i) impacto ambiental (representado por los índices *EIQ* y *RIPEST*) de las distintas estrategias de control implementadas, y ii) el margen bruto y el valor presente neto de la actividad.

#### 3.1 Impacto Ambiental

Actualmente existen numerosas formas de medir el impacto ambiental producido por los métodos de control de malezas. En este trabajo se consideraron dos criterios de evaluación bastante populares: *EIQ* y *RIPEST*.

##### **Coefficiente de Impacto Ambiental (EIQ).**

La metodología más conocida para cuantificar el impacto ambiental en la actividad agrícola es el *EIQ* [2]. Cada herbicida empleado puede estar compuesto por más de un ingrediente activo (*ia*), y cada *ia* contribuye de forma aditiva al *EIQ*. Éste índice tiene en cuenta los siguientes riesgos para el cálculo del impacto ambiental total: el del aplicador, el del consumidor (que también tiene en cuenta la posible contaminación de aguas subterráneas) y el ecotoxicológico (agua, aves, peces, abejas e insectos benéficos).

El *EIQ* propio de la aplicación de cierto herbicida por hectárea ( $EIQ_{aplicación}$ ) se determina según (14):

$$EIQ_{aplicación} = ia (\%) * Dosis * EIQ_{ia} \quad (14)$$

donde *ia* [%] es la concentración del ingrediente activo, *Dosis* representa la cantidad de herbicida aplicado por hectárea [L o kg/ha] y  $EIQ_{ia}$  es el coeficiente de impacto ambiental de cada *ia* del herbicida.

##### **Índice de Riesgo de Herbicidas (P).**

Debido a que el *EIQ* ha recibido varias críticas [4], se decidió incorporar también el índice *RIPEST* propuesto en [3], para complementar el cálculo de evaluación de impacto ambiental. Éste se calcula de acuerdo a funciones matemáticas de lógica difusa que denotan el grado de ocurrencia de un evento, aunque no tienen en cuenta el momento en que podrían ocurrir. El indicador varía entre 0 y 1, si el valor se acerca a cero el riesgo por su empleo es inaceptable, si se aproxima a uno se considera aceptable. El cálculo de *RIPEST* depende principalmente de la toxicidad y de la dosis empleada independientemente del tipo de formulación, la forma de aplicación o su clasificación química.

A continuación, se describe brevemente el procedimiento para su obtención (Fig. 3). Por cada herbicida utilizado es necesario especificar: dosis aplicada [g *ia*/ha] (*D*), dosis letal oral aguda en ratas [mg *ia*/1000 g rata] ( $LD_{50r}$ ) y la dosis letal oral aguda en abejas [mg *ia*/abeja] ( $LD_{50a}$ ). A partir de estos datos, es posible estimar la magnitud de la

toxicidad en mamíferos ( $T_{mam}$ ) e insectos ( $T_{ins}$ ) para cada herbicida en unidades tóxicas [tu] (15 y 16). La toxicidad total en mamíferos ( $Sum(T_{mam})$ ) e insectos ( $Sum(T_{ins})$ ) se calcula teniendo en cuenta la cantidad de ingredientes activos ( $iat$ ) presentes en todos los herbicidas aplicados por hectárea en un año (17 y 18). Posteriormente, con dichos valores, se calcula el índice de toxicidad en mamíferos ( $M$ ) (19) y el correspondiente a insectos ( $I$ ) (20). Finalmente, para determinar el impacto total anual de los herbicidas en una hectárea, ambos índices se integran a través de la regla de inferencia de Sugeno, que permite establecer el Índice de riesgo de los Herbicidas ( $P$ ) (21).

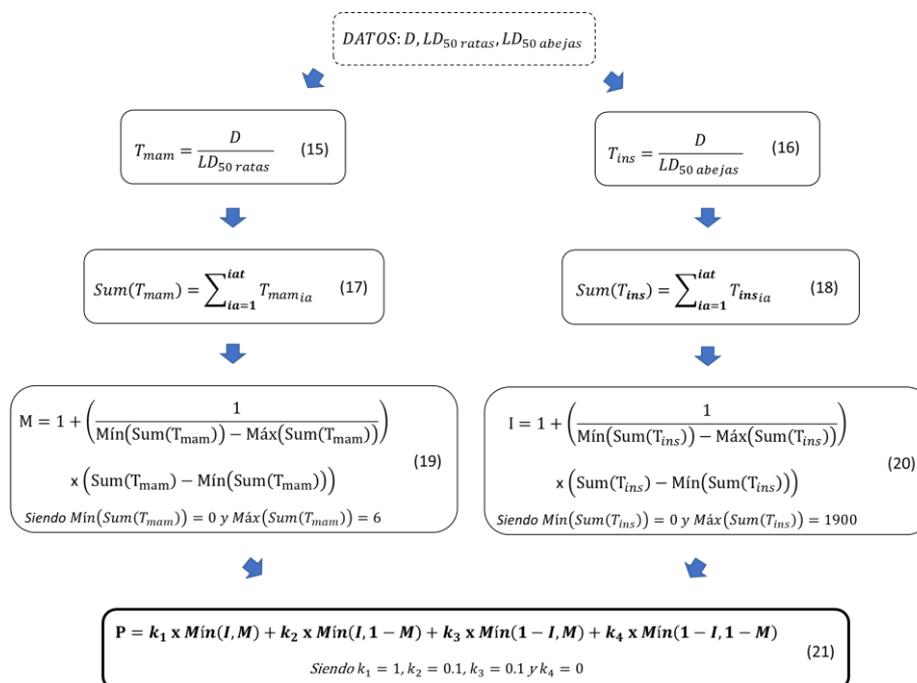


Fig. 3. Cálculo del índice RIPEST para herbicidas ( $P$ )

### 3.2 Evaluación Económica

El beneficio directo anual se determinó mediante el margen bruto ( $MB$ ) (22).

$$MB = Benef_{venta} - Gastos_{CC} - Gastos_S - Gastos_{Herb} - Gastos_{LSFijo} - Gastos_{LSVar} \quad (22)$$

$MB$  es el margen bruto [USD/ha];  $Benef_{venta}$  es el beneficio por la venta del cultivo [USD/ha](23);  $Gastos_{CC}$  son los gastos por cosecha y comercialización del cultivo [USD/ha](24);  $Gastos_S$  es un valor fijo por la compra de semillas, siembra y fertilización del cultivo [USD/ha];  $Gastos_{Herb}$  constituye la suma de los costos de cada herbicida aplicado por hectárea en un año [USD/ha](25);  $Gastos_{LSFijo}$  es el costo fijo de

limpieza del grano [USD/ha](26) y  $Gastos_{LS\_Var}$  es el costo de limpieza variable [USD/ha](27).

El costo de limpieza variable se aplica sólo si el porcentaje de semillas de malezas ( $\%Sem$ ) que levanta la cosechadora ( $\%Sem_{Cosec}$ ) y que permanece como materia extraña después del zarandeo ( $\%Sem_{zar}$ ) supera el 0.50% (basado en la Norma de calidad para la comercialización<sup>2</sup>). En ese caso, el costo es igual al precio de venta del cultivo por cada % que se sobrepase ese límite. Si el porcentaje de semillas de malezas es mayor al 1%, entonces al costo anterior se le suma el gasto de un zarandeo (5 USD/ton).

$$Benef_{Venta} = Rendim_{Cultivo} * Precio_{VentaCultivo} \quad (23)$$

$$Gastos_{CC} = Porcentaje * Rend_{Cultivo} * Precio_{VentaCultivo} \quad (24)$$

$$Gastos_{Herbidas} = \sum_{h=1}^{Herb_{totales}} Gastos_{Herbidas_h} \quad (25)$$

$$Gastos_{LS\_Fijo} = Costo_{Limpieza} * (Rend_{Cultivo} + Prod_{Semillas}) \quad (26)$$

$$\%Sem = \frac{Prod_{Sem}}{Rendim_{Cultivo} + Prod_{Sem}} * \%Sem_{Cosec} * \%Sem_{zar}$$

Si  $\%Sem > 0.50\%$ :

$$Gastos_{LS\_Var} = (\%Semillas - 0.50) * Precio_{VentaCultivo} \quad (27)$$

Si  $\%Sem > 1\%$ :

$$Gastos_{LS\_Var} = (\%Semillas - 0.50) * Precio_{VentaCultivo} \\ + Precio_{zar} * (Rendim_{Cultivo} + Prod_{Semillas})$$

Dado que la simulación propuesta pretende analizar un horizonte de varios años, es necesario determinar cómo los márgenes brutos ( $MB$ ) futuros se reflejan en la actualidad. Para ello, se introdujo el Valor Presente Neto ( $VPN$ ), que tiene en cuenta el valor temporal del dinero al considerar que aquello que se gastará (o ganará) en unos años, tendrá un valor diferente en el presente [5] (28).

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{MB_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (28)$$

Donde  $MB_t$  es el margen bruto esperado en el año  $t$ ,  $r$  es el costo de capital,  $I_0$  es la inversión inicial y  $n$  la cantidad de años.

<sup>2</sup> [https://www.cac.bcr.com.ar/sites/default/files/2019-01/norma\\_v\\_-\\_res\\_27-2013\\_-\\_anexo\\_a\\_-\\_cebada\\_cervecera.pdf](https://www.cac.bcr.com.ar/sites/default/files/2019-01/norma_v_-_res_27-2013_-_anexo_a_-_cebada_cervecera.pdf)

En los casos de estudio, se simuló un periodo de 5 años ( $n = 5$ ), considerando un costo de capital de 0.15 ( $r = 0.15$ ) y una inversión inicial nula ( $I_0 = 0$ ). El VPN proporciona una idea de si la inversión realizada producirá ganancias por encima de la rentabilidad exigida ( $r$ ) ( $VPN > 0$ ). Si en cambio,  $VPN < 0$ , la inversión produciría pérdidas por debajo del costo de capital. Evaluando el signo y la magnitud del VPN es posible establecer rápidamente si resulta conveniente cierta/s estrategia/s de manejo, siendo una herramienta de análisis fundamental en la toma de decisiones.

## 4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de simular una rotación multianual de trigo (ciclo intermedio) y cebada cervecera (ciclo corto) en competencia con *Avena fatua*, un sistema agrícola típico del sudoeste bonaerense. Con fines demostrativos, se simulan tres casos de estudio con distintas estrategias de manejo de la maleza en el periodo 2014-2018 (utilizando los datos meteorológicos obtenidos del EEA-INTA Bordaberry<sup>3</sup>).

Los datos específicos de ambos cultivos se presentan en la Tabla 1. Los parámetros del modelo que describen las fechas de los estados de los cultivos fueron generados a partir del software de predicción de ocurrencia de eventos fenológicos de cultivos CronoTrigo<sup>4</sup> y CronoCebada<sup>5</sup>. En cuanto a los parámetros de la maleza, se consideró una infestación inicial de *Avena fatua* de 2000 semillas/m<sup>2</sup>, un  $\%Sem_{Cosec}$  de 0.20 y un  $\%Sem_{zar}$  de 0.05.

**Tabla 1.** Datos de cultivos [1].

Cultivos (variedad)	Trigo (ACA 606)	Cebada (Q. carisma)
Precio [ $\$/USD/ton$ ]	185	150
Costo siembra [ $\$/USD/ha$ ]	215	210
Gastos Cosecha y Comercialización [ $\$/USD/ton$ ]	55.50	37.50
Área foliar total altamente competitiva [ $m^2/m^2$ ]	6	0.5
Máxima pérdida de rendimiento por malezas ( <i>MPRM</i> )	0.60	0.45
Tiempo térmico Madurez Fisiológica [ $^{\circ}C$ ]	2260	1727
Densidad Actual del Cultivo ( <i>DAC</i> ) [ $ind/m^2$ ]	200	250
Rendimiento Potencial (RP) [ $Tn/Ha$ ]	4	3.6

<sup>3</sup> <https://inta.gob.ar/documentos/informacion-agrometeorologica>

<sup>4</sup> <http://cronos.agro.uba.ar/index.php/cronos/cronotrig>

<sup>5</sup> <http://cronos.agro.uba.ar/index.php/cronos/cronocebada>

#### 4.1 CASO I

Se simula una estrategia de manejo basada en dos aplicaciones de un herbicida no selectivo (Glifosato LS 48%, 2 L/ha), al barbecho y en pre-siembra del cereal.

Los resultados (Tabla 2, CASO I) permiten observar que los rendimientos del cultivo superan el 68% de su rendimiento potencial en todos los años (variable  $RC/RP$ ), aunque esto no es suficiente para alcanzar márgenes brutos positivos, a excepción del año 2017. Cuando se siembra cebada (años 2015 y 2017), el rendimiento del cultivo se incrementa ya que, al ser de ciclo corto, logra competir mejor con la maleza. Sin embargo, esto no se refleja en el valor de  $RC/RP$  del año 2015, debido a que éste presenta una gran cantidad de picos de emergencia de *Avena fatua* (datos no mostrados).

A su vez, se puede comprobar que la producción de semillas de *Avena fatua* es mayor en los años con trigo (57%, 57 % y 37%), lo que contribuye a que existan gastos variables por limpieza de cereal en esos años (2014, 2016 y 2018). En el caso de la cebada son nulos ya que la producción de semillas de maleza cuando se siembra cebada es solo del 21%. Este costo extra en los años de trigo, necesario para cumplir con los requisitos de calidad del producto, es el que contribuye a que el margen bruto en dichos años sea mucho más negativo que en los restantes.

En cuanto al VPN, su valor negativo indica que el sistema no dará ganancias empleando esta estrategia de manejo.

#### 4.2 CASO II

En este caso se simula una estrategia de control basada en dos aplicaciones de Glifosato (LS 48%, 2 L/ha) en barbecho y pre-siembra, combinadas con una aplicación de un herbicida selectivo postemergente residual (Flucarbazone Sódico WDG 70%, 80 g/ha) en trigo y de un graminicida selectivo (Pinoxaden CE 6%, 0,8 L/ha) en cebada. El momento de aplicación postemergente en ambos casos corresponde a un umbral de 80 ind/m<sup>2</sup> de AVEFA en estado vegetativo temprano. Dicho umbral de referencia se seleccionó más o menos arbitrariamente buscando un criterio que permita optimizar la eficiencia de control con herbicidas postemergentes.

Los rendimientos obtenidos al implementar estas medidas (Tabla 2, CASO II) superan todos los años el 80% del rendimiento potencial del cultivo ( $RC/RP$ ). Los mismos son mayores que en el CASO I ya que el control postemergente redujo la cantidad de semillas de AVEFA, disminuyendo el banco de semillas inicial en los años subsiguientes y, por ende, reduciendo el grado de competencia de la maleza con el cultivo.

La máxima producción de semillas se alcanzó en el año 2015 con un 15% (año con mayores picos de emergencia de maleza) demostrando que, en dicho período, aun con aplicaciones postemergentes, no se logró controlar eficientemente la AVEFA. De todas maneras, las medidas de control efectuadas logran reducir suficientemente las semillas de malezas a fin de ciclo, evitando así costos de limpiezas adicionales del cultivo generando márgenes brutos positivos en todos los años exceptuando el 2015. Estos gastos provocan que ese sea el único año en que no se obtienen ganancias por la infestación de malezas comentada.

Sin embargo, como era de esperar el impacto ambiental se incrementa en este caso debido a que se realizaron más aplicaciones de herbicidas. El índice P empeora un 1% en los años de siembra de trigo y un 5% en los de cebada, ya que en el pinoxaden produce consecuencias más negativas en el medio ambiente que el flucarbazone sódico. Este hecho también se ve reflejado en el EIQ, aunque su variación no sea tan notoria.

El VPN resultó positivo en este caso, lo que sugiere que esta estrategia de control sería rentable.

### 4.3 CASO III

Se efectúa una estrategia combinada de acciones de control químico y manejo cultural basadas en el *MIM*. En particular, las fechas de siembra de los cereales (Tabla 2, CASO III) se atrasaron lo más posible a fin de evitar los mayores picos de emergencia de AVEFA (datos no mostrados). Además, se utilizó un cultivar de trigo altamente competitivo (Área foliar total altamente competitiva = 1 y  $RP_T = 3$ ) a diferencia de los CASOS I-II (cultivar estándar). Como medida adicional de manejo cultural, se aumentó la densidad de siembra en ambos cereales ( $DAC_T = 300$  y  $DAC_C = 270$ ). La estrategia de manejo químico fue idéntico al CASO II.

Los resultados obtenidos (Tabla 2, CASO III) presentan rendimientos superiores al 97% del rendimiento potencial del cultivo. Cabe destacar que,  $RC/RP$  es igual al 100% en todos los años en que se sembró trigo, debido a que, en este caso, se trata de un cultivar altamente competitivo con una baja competencia de AVEFA sobre el mismo. Esto también se ve reflejado en los márgenes brutos ya que, aunque son positivos en todos los años, son notoriamente superiores cuando se trata de trigo porque en estas condiciones genera un mayor rendimiento (aunque siempre es más rentable el trigo que la cebada).

Es evidente que la estrategia de control implementada es mucho más eficiente que en el resto de los casos, ya que permite competir mejor contra la maleza, alcanzando una producción de semillas máxima de sólo un 5.8% con una reducción progresiva con los años. A pesar de que aumenta el riesgo ambiental con respecto al CASO I en los años 2014 a 2016, éste disminuye en comparación con el CASO II en los años 2017 y 2018. Esto se produce porque el umbral de control establecido para la aplicación selectiva postemergente ( $80 \text{ plantas/m}^2$ ) permitió reducir el número de aplicaciones.

En relación al VPN, éste se incrementó en un 494% con respecto al CASO II lo cual indica una ventaja económica asociada al manejo cultural. Estos resultados avalan los beneficios de utilizar medidas de manejo integrado para el control sustentable de malezas.

### 4.4 Análisis de Sensibilidad

El análisis de los resultados sugiere que uno de los parámetros que más afecta el margen bruto de la actividad es el costo de limpieza de las semillas del cultivo, el cual lógicamente será superior cuanto mayor sea el porcentaje de semillas de maleza que se cosechen. Debido a que no hay un dato preciso de dicha proporción, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar en qué magnitud este parámetro altera los márgenes brutos

**Tabla 2.** Resultados de las simulaciones aplicando los métodos de control del CASO I, CASO II y CASO III.

	CASO I					CASO II					CASO III				
	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016	2017	2018
Cultivo	T	C	T	C	T	T	C	T	C	T	T	C	T	C	T
Siembra	01/07	26/07	01/07	26/07	01/07	01/07	26/07	01/07	26/07	01/07	16/07	15/06	29/06	14/07	01/08
Emergencia	20/07	14/08	20/07	14/08	20/07	20/07	14/08	20/07	14/08	20/07	02/08	08/07	19/07	04/08	17/08
PCC Inicial	21/10	22/10	21/10	22/10	21/10	21/10	22/10	21/10	22/10	21/10	25/10	17/10	20/10	21/10	29/10
PCC Final	10/11	11/11	10/11	11/11	10/11	10/11	11/11	10/11	11/11	10/11	14/11	06/11	09/11	10/11	18/11
Glifosato	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	01/4	10/4	01/4	01/4
Glifosato	30/6	25/7	30/6	25/7	30/6	30/6	25/7	30/6	25/7	30/6	15/7	14/6	28/6	13/7	31/7
Fluc. Sódico	-	-	-	-	-	17/8	-	31/7	-	17/8	20/8	-	01/8	-	-
Pinoxaden	-	-	-	-	-	-	11/8	-	22/8	-	-	19/8	-	-	-
RC/RP	0.70	0.68	0.70	0.82	0.68	0.87	0.81	0.90	0.99	0.97	1.00	0.97	1.00	0.99	1.0
MB	-107.4	-19.6	-111.6	25.9	-57.9	21.7	-21.0	31.4	40.6	55.5	177.0	33.0	181.8	82.7	194.2
VPN	-195.3					74.4					442.2				
Índice P	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.64	0.68	0.64	0.68	0.68	0.64	0.68	0.69	0.69
EIQ	29.38	29.38	29.38	29.38	29.38	30.31	30.11	30.31	30.11	30.31	30.31	30.11	30.31	29.38	29.38
Prod. Semillas	57%	21%	57%	21%	37%	12%	15%	5.7%	0.9%	1.3%	5.8%	1.9%	0.8%	0.7%	0.4%

logrados a lo largo de los años, representados en el momento actual por medio del *VPN*. Para ello, se simularon nuevamente los tres casos anteriores, considerando que la cantidad de maleza cosechada junto con el cultivo ( $\%Sem_{Cosec}$ , Ec. 32) es del 5, 10 y 20% de la maleza presente.

Como puede observarse en la Fig. 4A los distintos porcentajes de semilla de maleza cosechados afectan significativamente al *VPN* en el CASO I.

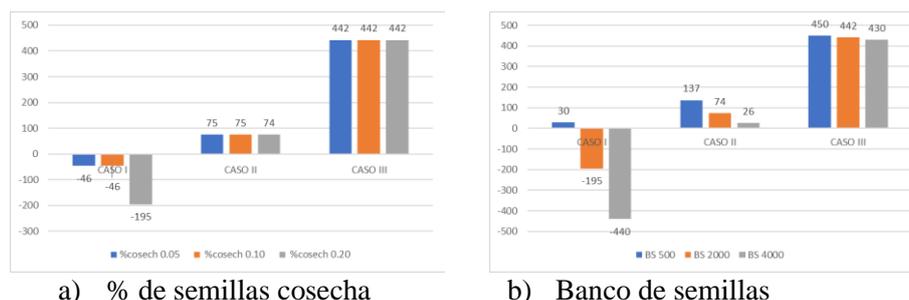


Fig. 4. Análisis de sensibilidad.

Cuanto mayor sea la cantidad de semillas recolectadas por la cosechadora, los gastos variables de limpieza comienzan a aumentar, por lo que el margen bruto se reduce y consecuentemente el *VPN*. En el CASO I, se observa que el *VPN* casi no varía cuando  $\%Cosec$  es 5 y 10, pero disminuye notoriamente cuando dicho porcentaje es igual a 20. En los casos en los que se realiza algún tipo de control postemergente (casos II y III), el *VPN* permanece relativamente invariable, ya que existe un mayor control de la maleza. A pesar de ser un parámetro muy difícil de establecer (ya que depende de muchos factores tales como el tipo de cosechadora, su velocidad, momento de cosecha, estado de la maleza, etc), es importante al menos considerar su variabilidad analizando casos extremos.

Asimismo, el banco de semillas inicial de AVEFA también tiene una gran influencia en el *MB*, ya que se vincula directamente con el rendimiento, el precio de venta del cereal y los costos operativos relacionados con la intensidad y frecuencia de uso de herbicidas y aquellos asociados a la limpieza de semillas.

En la Fig. 4 b) se observa el efecto del aumento de la infestación inicial (500, 2000 y 4000 semillas/m<sup>2</sup>) sobre el *VPN* para los tres casos estudiados. Nuevamente, el CASO I es el más sensible a este parámetro, disminuyendo progresivamente el *VPN* a medida que el banco de semillas inicial aumenta. Para el CASO II sucede algo similar al CASO I aunque no tan extremo, ya que la caída del *VPN* en relación al aumento del *BS* no es tan abrupta. En el CASO III se observa claramente la ventaja del *MIM* sobre los CASOS I y II, ya que es el único en el que el *VPN* no varía significativamente. Estos análisis de sensibilidad reflejan la importancia de contar con estrategias de control de malezas adecuadas que eviten su establecimiento, especialmente en contextos de altas infestaciones.

## 5 Conclusiones

En el presente trabajo se propuso cuantificar económica y medioambientalmente la influencia de las distintas estrategias de control de malezas en el desempeño del sistema. Para ello se empleó un modelo de simulación de la maleza *Avena fatua* en competencia con cereales de invierno (rotación alternada trigo y cebada) en un horizonte de planeamiento de cinco años. Los resultados de los tres casos de estudio evaluados a través de simulaciones permite concluir lo siguiente: (i) en general no es posible controlar eficazmente la maleza únicamente con aplicaciones en barbecho y pre-siembra del cultivo; (ii) los métodos de control químico combinados (barbecho, pre-siembra y postemergencia) permiten obtener valores presentes netos positivos, lo cual indica ganancias en los cinco años simulados pero a costa de un impacto ambiental relativamente elevado; (iii) la estrategia de manejo integrado (control cultural y químico) provee la mayor ganancia económica con impacto ambiental moderado.

El modelo agro-económico propuesto constituye una herramienta útil para guiar el complejo proceso de toma de decisiones de la actividad agrícola, ya que permite estimar los efectos económicos de implementar ciertas estrategias de control y el impacto ambiental asociado a través de los índices *EIQ* y *RIPEST*.

## 6 Referencias

1. Molinari, F. A., Blanco, A., & Chantre, G. R.: Manejo integrado de malezas: simulación del sistema multianual AVEFA-trigo/cebada. In X Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 47 (CABA, 2018).
2. Kovach, J; Petzold, C; Degnil, J y Tette, J.: A method to measure the environmental impact of pesticides. New York's Food and Life Sciences Bulletin 139: 1-8 (1992).
3. Ferraro, D. O., Ghersa, C. M., & Sznajder, G. A.: Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. Agriculture, Ecosystems & Environment, 96(1-3), 1-18. (2003).
4. Kniss, A. R., & Coburn, C. W.: Quantitative evaluation of the environmental impact quotient (EIQ) for comparing herbicides. PLoS one, 10(6). (2015).
5. Wetekamp, W.: Net Present Value (NPV) as a tool supporting effective project management. In Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (Vol. 2, pp. 898-900). IEEE. (2011).