



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTORADO EN AGRONOMÍA

**Desarrollo de un Modelo de Simulación para la
Asistencia a la Toma de Decisiones Agronómicas
en el Manejo Integrado de Malezas**

Franco Ariel Molinari

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2023

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en ámbito del Departamento de Agronomía y el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) durante el período comprendido entre 15 de noviembre de 2016 y 19 de abril de 2023, bajo la dirección de los Dres. Guillermo R. Chantre Balacca y Aníbal M. Blanco.

Ing. Agr. Franco Ariel Molinari
DNI: 36.328.032



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Subsecretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el 30/06/2023, mereciendo la calificación de sobresaliente diez (10)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mis directores, los Dres. Guillermo Chantre y Aníbal Blanco, por la orientación, formación, guía y apoyo que me brindaron durante todo el camino.

También quiero agradecer a mis compañeros del Departamento de Agronomía, por las horas de trabajo y momentos compartidos, fundamentales para recargar energías y continuar en este camino. En especial a mis compañeros: Lu, Sofi, Juan, Ale, Cami y al grupo de malezas Riqui, Lau y Mer.

Asimismo, deseo agradecer a Mario Vigna, Luis Carretto y el equipo de malezas de la EEA INTA Bordenave, por apoyarnos y aconsejarnos, por su excelente predisposición a colaborar y por proporcionar información experimental de trascendental importancia que de otro modo no habría podido conseguir. También agradezco a Víctor Juan y Federico Nuñez Fré, por contribuir a este proyecto compartiendo sus datos y prestándose a enriquecedores intercambios.

Agradezco también al personal docente y no docente del Departamento de Agronomía por la amabilidad y la buena predisposición diaria, especialmente a la cátedra de Agrometeorología y al grupo docente del Taller de Recursos Naturales II, durante la etapa final de esta tesis.

Quiero expresar mi gratitud a la Universidad Nacional del Sur, al Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS), a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el apoyo económico y el marco institucional brindado para llevar a cabo esta tesis.

Finalmente quiero dedicar un agradecimiento especial a Cynthia y a toda mi familia, quienes me brindaron refugio, acompañamiento y apoyo incondicional en todo momento. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

Algunas especies vegetales se consideran malezas debido a que alcanzan niveles poblacionales tales, que al competir con los cultivos causan perjuicios sobre su producción. Por este motivo, en determinadas ocasiones es necesario realizar operaciones de control sobre las poblaciones de malezas para reducir su infestación hasta valores que permitan obtener niveles de producción deseados.

A nivel mundial el control químico ha sido el método más práctico y eficiente para controlar malezas, especialmente en cultivos extensivos. Sin embargo, el uso continuo de herbicidas desde hace más de 40 años trajo aparejado un impacto negativo sobre el medio ambiente, la salud y la proliferación de malezas resistentes. Estas consecuencias se deben tener en cuenta para definir manejos adecuados a largo plazo.

Desde una perspectiva estratégica, un programa sostenible de manejo de malezas debería basarse en una combinación de métodos tanto preventivos como curativos que apliquen principios basados en el conocimiento, dando lugar a lo que se conoce como Manejo Integrado de Malezas, MIM. En este contexto, el modelado matemático se presenta como una herramienta apropiada para ayudar a guiar el proceso de toma de decisiones asociado al MIM.

En esta tesis se propone un modelo de simulación para asistir en la toma de decisiones relacionadas con el MIM. El modelo se desarrolló en colaboración con profesionales extensionistas y fue concebido como una herramienta flexible y adaptable a diversos sistemas de producción agrícola, poseyendo un mayor nivel de detalle que otros modelos similares.

Dicho modelo permite simular la dinámica multianual de una maleza en competencia con el cultivo. El ciclo de vida de la maleza se representa a través de los componentes demográficos típicos (ej. banco de semillas, plántulas, adultos en estado vegetativo y reproductivo, producción de semillas). El desarrollo del cultivo se simula de forma simplificada a fin de cuantificar diariamente los efectos de la competencia interespecífica. La simulación de distintas estrategias de MIM permite calcular y comparar indicadores económicos, ambientales y agronómicos.

Palabras claves: Manejo Integrado de Malezas, Modelado de sistemas agrícolas, *Avena fatua* L., *Euphorbia davidii* Subils., Trigo, Cebada, Soja, Competencia de malezas, Asistencia a la toma de decisiones, Margen bruto, Valor actual, Impacto ambiental, Malezas resistentes, Dinámica poblacional de malezas.

ABSTRACT

Some species considered weeds reach population levels that impact on crops' production. For this reason, on certain occasions, it is necessary to carry out control operations to reduce weed infestations to levels compatible with reasonable crops' yields.

Worldwide, chemical control has been the most practical and efficient method for controlling weeds, especially in extensive crops. However, the continuous use of herbicides for over 40 years generated a well-known negative impact on environment and health and the proliferation of resistant species. These environmental consequences must be taken into account to define appropriate long-term management practices.

From a strategic perspective, a sustainable weed management program should be based on a combination of preventive and curative methods that apply knowledge-based principles, leading to as the so-called Integrated Weed Management (IWM). In this context, mathematical modelling arises as an appropriate tool to assist in the decision-making process associated with IWM.

This thesis proposes a simulation model to support decision-making related to IWM. The model was developed in collaboration with extensionists and was conceived as a flexible and adaptable tool for various agricultural production systems, possessing a higher level of detail than similar models.

This model simulates multi-year dynamics of a weed in competition with a crop. The weed's life cycle is represented through typical demographic components (e.g. seed bank, seedlings, vegetative and reproductive individuals, and seed production). The development of the crop is simulated in a simplified manner in order to quantify the daily effects of interspecific competition. The simulation of different IWM strategies allows for the quantification and comparison of economic, environmental, and agronomic indexes.

Keywords: Integrated Weed Management, Agricultural Systems Modeling, *Avena fatua* L., *Euphorbia davidii* Subils., Wheat, Barley, Soybean, Weed Competition, Decision Support, Gross Margin, Present Value, Environmental Impact, Resistant Weeds, Weed Demography.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

ARTICULOS EN REVISTAS CIENTIFICAS CON REFERATO (incluidas en SJR)

- **Molinari, F.A.**; Blanco, A.M.; Núñez Fré, F.R.; Juan, V.F.; Chantre, G.R. A Weed Population Dynamics Model for Integrated Weed-Management Decision-Making Support: *Euphorbia davidii* Subils in Soybean Crops as a Simulation Study. *Agronomy* 2022, 12, 2369. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102369>
- **Molinari, F.A.**; Blanco, A.M.; Vigna, M. y Chantre, G.R. (2020). Towards an integrated weed management decision support system: A simulation model for weed-crop competition and control. *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier. 175, 105597. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105597>

CAPÍTULOS DE LIBRO:

- **Molinari, F.A.**; Blanco, A.M.; Vigna, M. y Chantre, G.R. (2020). A simulation model for Integrated Weed Management: *Avena fatua*-Winter wheat as study case in the Semiarid Pampean Region of Argentina. En: *Decision Support Systems for Weed Management*. Chantre, G.R. & Gonzalez-Andujar, J.L. (Eds). Editorial Springer Nature Switzerland AG. pp. 311–333. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_15

ARTICULOS EN OTRAS REVISTAS CIENTIFICAS

- Damiani, L., **Molinari, F.**, Frutos, M., Chantre, G., & Blanco, A. (2022). Optimización mixto entera no lineal multi-objetivo basada en PSO con aplicación al manejo integrado de malezas. *Electronic Journal of SADIO (EJS)*, 21(2), 161-180. <https://publicaciones.sadio.org.ar/index.php/EJS/article/view/226>

ARTICULOS COMPLETOS PUBLICADOS EN ACTAS DE CONGRESOS:

- **Molinari, F.A.**; Blanco, A.M.; Núñez Fré, F.R.; Juan, V.F. y Chantre, G.R. Simulación de Manejo Integrado de Malezas: Sistema *Euphorbia davidii* – Soja. *XIV Congreso Argentino de AgroInformática (CAI - SADIO 2022) / 51 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO)*. On line, 18-19 de octubre de 2022. ISSN: 2451-7496 - Pp 35-48.
- Damiani L., **Molinari F.A.**, Chantre G.R., Blanco A.M. (2021). Planeamiento óptimo del Manejo Integrado de Malezas. *XIII Congreso Argentino de AgroInformática (CAI - SADIO 2021) / 50 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO)*. On line, 25-26 de octubre de 2021. ISSN: 2525-0949 - Pp 8-21.
- Damiani L., **Molinari F.A.**, Blanco A.M., Chantre G.R. (2020). Modelo de Simulación para el Manejo Integrado de Malezas: Análisis económico y medioambiental. *XII*

Congreso Argentino de AgroInformática (CAI - SADIO 2020) / 49 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO). On line, 26-28 de octubre de 2020. ISSN: 2525-0949 - Pp 13-25.

- **Molinari, F.A.;** Blanco, A.M.; Chantre, G.R. (2018) Manejo Integrado de Malezas: Simulación del sistema multianual AVEFA-Trigo/Cebada. *X Congreso Argentino de AgroInformática (CAI - SADIO 2018) / 47 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO). Buenos Aires, 3-7 de septiembre 2018. ISSN 2525-0949. Pp. 110-122.*
- **Molinari, F.A.;** Blanco, A.M.; Chantre, G.R. (2017) Manejo Integrado de Malezas: un enfoque de simulación: aplicación al sistema AVEFA-Cebada. *IX Congreso Argentino de AgroInformática (CAI - SADIO 2017) / 46 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO)/43 Conferencia Latinoamericana de Informática (CLEI). Córdoba, 4-8 de septiembre 2017. ISSN 2525-0949. Pp. 180-193.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PREFACIO	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VIII
CAPÍTULO 1: Introducción	1.1
1.1 Cultivos y malezas	1.1
1.2 Herbicidas.....	1.2
1.3 Manejo Integrado de Malezas (MIM)	1.3
1.4 Sistemas de soporte a la toma de decisiones agronómicas.....	1.6
1.1. Marco teórico	1.7
1.2. El modelo propuesto	1.10
1.3. Hipótesis y objetivos.....	1.12
1.4. Objetivos específicos	1.12
CAPÍTULO 2: Materiales y Métodos	2.1
2.1 Descripción general del sistema maleza-cultivo	2.2
2.2 Banco de semillas	2.7
2.3 Emergencia a campo	2.7
2.4 Dinámica poblacional de la maleza	2.8
2.5 Competencia intraespecífica de la maleza	2.11
2.6 Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza	2.12

2.7 Competencia interespecífica de la maleza sobre el cultivo	2.14
2.8 Producción de semillas	2.15
2.9 Mortalidad poblacional	2.15
2.10 Acciones de control	2.16
2.11 Módulo de evaluación económica	2.17
2.12 Módulo de impacto ambiental	2.18
2.13 Resultados demostrativos del modelo propuesto	2.19
2.13.1 Caso I: Baja infestación de la maleza	2.20
2.13.2 Caso II: Infestación intermedia de la maleza	2.22
2.13.3 Caso III: Acciones de control de la maleza	2.24
Sub-caso III a, control químico	2.24
Sub-caso III b, control químico con efecto residual	2.27
2.13.4 Caso IV: Cultivo y fechas de siembra	2.30
Sub-caso IV a, siembra temprana	2.30
Sub-caso IV b, siembra tardía.....	2.32
2.14 Conclusiones de los casos demostrativos	2.34
CAPÍTULO 3: Sistema <i>Avena fatua</i> - trigo pan/cebada cervecera	3.1
3.1 Introducción	3.1
3.2 Materiales y métodos.....	3.4
3.2.1 Descripción general del modelo	3.4
3.2.2 Diagrama anual, variables y parámetros.....	3.4
3.2.3 Información agrometeorológica.....	3.9
3.2.4 Emergencia de la maleza	3.9
3.2.5 Dinámica poblacional	3.9

3.2.6	Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza	3.10
3.2.7	Producción de semillas	3.11
3.2.8	Parámetros económicos, ambientales y de control	3.12
3.3	Calibración y validación	3.14
3.3.1	Estimación del rendimiento esperado	3.14
3.3.2	Metodología calibración y validación	3.14
3.4	Resultados y análisis	3.17
3.4.1	Competencia interespecífica	3.17
3.4.2	Descripción general de los casos de estudio	3.18
	Caso I, Métodos de control químico tradicional en AVEFA susceptible .	3.19
	Caso II, Métodos de control químico tradicional en AVEFA resistente a ACCasas	3.21
	Caso III, Control químico y estrategias culturales en AVEFA resistente a ACCasas	3.23
	Caso IV, Manejo químico y cultural en AVEFA resistente a ACCasas.....	3.25
	Caso V, Manejo químico y cultural en AVEFA susceptible	3.27
	Evaluación y comparación de los escenarios AVEFA-cereal	3.29
3.5	Discusión y Conclusión	3.31
 CAPÍTULO 4: SISTEMA <i>EUPHORBIA DAVIDII</i> SUBILIS – SOJA		4.1
4.1	Introducción	4.1
4.2	Materiales y métodos.....	4.4
4.2.1	Adaptación del modelo.....	4.4
4.2.2	Diagrama anual, variables y parámetros	4.4
4.2.3	Información agrometeorológica	4.10
4.2.4	Emergencia de la maleza	4.10

4.2.5	Dinámica poblacional	4.11
4.2.6	Competencia intraespecífica	4.11
4.2.7	Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza	4.12
4.2.8	Producción de semillas	4.13
4.2.9	Parámetros económicos, ambientales y de control	4.14
4.3	Calibración y validación	4.17
4.3.1	Estimación del rendimiento esperado	4.17
4.3.2	Metodología, calibración y validación	4.17
4.4	Resultados	4.19
4.4.1	Ajuste de un modelo de predicción de emergencia	4.19
4.4.2	Dinámica poblacional	4.20
4.4.3	Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza	4.23
4.4.4	Casos de estudio	4.24
	Casos anuales (horizonte operativo)	4.24
	Caso I. Manejo combinado (Control mecánico + medidas culturales) ...	4.25
	Caso II. Manejo combinado (medidas culturales + control químico)	4.27
	Caso III: Multianual (horizonte táctico-estratégico)	4.29
4.5	Discusión y conclusión	4.33
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		5.1
5.1	Discusión general	5.1
5.2	Conclusiones generales	5.5
5.3	Trabajo futuro	5.7
BIBLIOGRAFÍA		B.1

ANEXO I.....	AI.1
AI.1 Módulo económico	AI.1
AI.1.1 Margen Bruto (MB).....	AI.1
AI.1.2 Valor Actual (VA).....	AI.4
AI.2 Módulo de impacto ambiental.....	AI.5
AI.2.1 Coeficiente de Impacto Ambiental (EIQ)	AI.5
AI.2.2 Índices de Riesgo.....	AI.7
ANEXO II	AII.1
AII.1 Competencia Intraespecífica.....	AII.1
AII.1.1Caso I, baja infestación de E. davidii.....	AII.1
AII.1.2Caso II, alta infestación de E. davidii	AII.3
AII.2 Carga de datos para la simulación	AII.4

CAPÍTULO 1

Introducción

En este capítulo se revisan los elementos más importantes relacionados con las malezas en la agricultura moderna, incluyendo aspectos bioecológicos y agronómicos. A continuación, se hace una descripción del empleo de modelos matemáticos aplicados al manejo integrado de las mismas y su uso como herramientas de asistencia a la toma de decisiones. Luego, se enuncian las hipótesis y los objetivos que dan lugar a la investigación. Finalmente se describe brevemente la estructura de esta tesis.

1.1. Cultivos y malezas

La agricultura es una de las principales actividades económicas de la Argentina, produciendo bienes para abastecer al país y exportar al resto del mundo. Cerca del 13% de los 280 millones de hectáreas de superficie continental del país se encuentra destinada a cultivos agrícolas¹. En estas áreas se siembra principalmente soja, trigo, maíz, girasol, sorgo y cebada. Nuestro país produce el 5% del total de granos del mundo y posee el 15% de participación en el comercio mundial de granos y subproductos. Debido a esta gran participación comercial, continuamente se intenta alcanzar el mayor rendimiento posible de los cultivos. Si bien existen varios factores que intervienen en ello, en esta tesis nos centraremos en la problemática que generan las malezas debido

¹ <https://surdelsur.com/es/agricultura-argentina/> (Página web, accedido febrero 2023)

a sus efectos negativos, directos e indirectos, sobre el rendimiento y el manejo de los cultivos.

La definición clásica de una maleza dice que puede ser cualquier planta que interfiere con los objetivos o propósitos del hombre. Este concepto tiene un origen antropocéntrico, y como la caracterización de una maleza es determinada por la actividad humana, puede variar según el tiempo, el espacio y la cultura. Desde un enfoque agronómico las malezas dificultan la producción de cultivos, limitando el crecimiento de las plantas cultivadas, por competencia de recursos ambientales, luz, agua y nutrientes o a través de la liberación de compuestos químicos (alelopatía). Desde un punto de vista productivo, las malezas han sido la principal causa de pérdida de rendimiento de los cultivos desde las primeras etapas de la agricultura (Oerke, 2006) y además pueden afectar la inocuidad del producto, reduciendo su valor. Por otro lado, pueden servir como albergue de plagas y patógenos dañinos para el cultivo. Debido a estos perjuicios, tanto de rendimientos como de calidad, en situaciones de alta infestación se hace necesario su control para alcanzar buenos resultados económicos en la actividad agrícola.

El esfuerzo humano para controlar las malezas es tan antiguo como el comienzo mismo de la agricultura. Inicialmente, la remoción de malezas era manual, más tarde esta práctica se reemplazó por el empleo de herramientas y luego se usó la tracción a sangre para su control. A su vez, los animales fueron siendo reemplazados por tractores y a mediados del siglo XX aparecieron los herbicidas facilitando radicalmente el manejo de las malezas, principalmente en cultivos extensivos. Desde entonces, se ha desarrollado una diversidad de productos químicos y su uso se ha generalizado al punto de convertirse en la principal herramienta para controlar malezas en los cultivos.

1.2. Herbicidas

Durante muchas décadas, los herbicidas han sido el medio de control de malezas más utilizado en cultivos convencionales debido a su simplicidad de uso, efectividad y asequibilidad. Por estas razones, su empleo se circunscribió durante mucho tiempo a la aplicación rutinaria del agroquímico, sin considerar aspectos de la bioecología de las malezas ni su integración con otras técnicas de control. Sin embargo, se ha demostrado que el uso ininterrumpido de herbicidas ha provocado la pérdida de eficacia por el incremento de los casos de resistencia, así como también un severo impacto negativo sobre los ecosistemas y la salud humana.

Según el Herbicide Resistant Action Committee (HRAC)² la resistencia a los herbicidas es la capacidad natural de una maleza para sobrevivir a la aplicación de un herbicida que normalmente la controlaría.

En los últimos años, en los sistemas agrícolas actuales se han presentado cada vez más cantidad de poblaciones de malezas difíciles de controlar, tanto resistentes como tolerantes a herbicidas. Los biotipos resistentes, además de requerir mayores dosis y frecuencias de aplicación en comparación con los biotipos susceptibles, imposibilitan un control efectivo repercutiendo negativamente sobre la producción. Esta problemática no solo se aprecia en Argentina, sino que también cobra gran importancia en otros países de Latinoamérica, EE. UU. y Australia, entre otros. Según la revista Weed Science³, a la fecha, existen en todo el mundo 515 casos de resistencia, en 267 especies maleza.

Adicionalmente, el uso intensivo de herbicidas también es cuestionado debido a los perjuicios que ocasionan sobre la flora y fauna benéfica, la contaminación de suelos y aguas, intoxicaciones humanas agudas y crónicas, residuos en alimentos, etc. Debido a distintos tipos de deriva, los herbicidas pueden incluso afectar zonas donde no se han

² <https://hracglobal.com/herbicide-resistance> (Página web, accedido febrero 2023)

³ <https://www.weedscience.org/Home.aspx> (Página web, accedido febrero 2023)

realizado aplicaciones, y por ende, a la fauna y flora. Además, varios trabajos indican que ciertos herbicidas pueden estar asociados con un aumento en la incidencia de cáncer y otras enfermedades de los sistemas inmunológico, endócrino, nervioso y reproductor (Ojelade et al., 2022; Tudi et al., 2022).

Debido al creciente aumento de la resistencia a herbicidas, los efectos negativos sobre el medio ambiente y el ser humano, surge el Manejo Integrado de Malezas con el objetivo de propiciar un desarrollo sustentable de la actividad agrícola, que considere tanto la protección del medioambiente como la viabilidad económica y productiva.

1.3. Manejo Integrado de Malezas (MIM)

El MIM puede ser definido como un proceso de toma de decisiones que combina diferentes técnicas para el manejo de malezas teniendo en cuenta información ambiental y bioecológica tanto de los cultivos como de las malezas (Menalled, 2010).

Esta metodología de manejo busca combinar criteriosamente las múltiples técnicas de control existentes con el fin de reducir la interferencia de las malezas y limitar su propagación, aceptando el hecho de que ninguna técnica individual es totalmente efectiva o carente de consecuencias negativas. De esta forma se procura reducir la cantidad de productos químicos aplicados, de forma tal que el riesgo para la salud humana y el ambiente sean mínimos. Esta forma de lidiar con las malezas pretende reducir su presencia a niveles tales que los perjuicios económicos producidos se hallen por debajo de un umbral económico aceptable para el sistema general de producción (Coble y Mortensen, 1992). Básicamente, el MIM utiliza los herbicidas como herramientas terapéuticas cuando las medidas preventivas, como la rotación de cultivos, el cambio de la densidad de siembra y el uso de variedades de cultivo más competitivas, no son suficientes para disminuir el nivel poblacional de malezas a un nivel adecuado.

Existen varios métodos de control de malezas que se pueden combinar a través del MIM. A continuación, se detalla cada uno de ellos en base a la información provista por la red GROW⁴ (Getting Rid Of Weeds - organización conformada por un grupo de agrónomos, científicos especialistas en malezas y economistas de EE. UU.) y FAO⁵ (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).

- *Prevención de la dispersión de semillas de malezas:* Es una parte importante del MIM, aunque muchas veces se la subestima. La dispersión de semillas ocurre naturalmente, por el viento, agua y animales y también por actividades humanas. Esta última puede reducirse e incluso eliminarse con una planificación y manejo apropiado.
- *Monitoreo de las poblaciones de malezas:* La recopilación sistemática de datos sobre la distribución de las especies de malezas que afectan a las distintas etapas del proceso productivo es útil en el corto plazo, para tomar decisiones inmediatas para un control adecuado y evitar pérdidas en el cultivo. A mediano y largo plazos, estos registros constituyen una buena base para evaluar la efectividad de los controles llevados a cabo y contribuyen a una toma de decisiones más informada.
- *Control cultural:* Implica diversos manejos agronómicos con el objetivo de ayudar a que el ambiente sea más favorable para el desarrollo del cultivo, intentando que sea más competitivo frente a la maleza. Entre las medidas culturales se destacan:
- *Rotación de cultivos:* Esta práctica involucra la alternancia en el tiempo de diferentes cultivos en el mismo lote. Debido a que algunas especies de malezas se adaptan a los ciclos de los cultivos habitualmente sembrados, una buena rotación de cultivos tiende a desestabilizar y dificultar su desarrollo. Mientras más diversas sean estas rotaciones, mejor será la interrupción del ciclo de vida de la maleza. Otro beneficio asociado a esta medida es que al tratarse de

⁴ GROW <https://growwm.org/what-is-integrated-weed-management/> (Página web, accedido febrero 2023)

⁵ FAO <http://www.fao.org/3/a0884s/a0884s.pdf> (Página web, accedido febrero 2023)

distintos cultivos se da la oportunidad de utilizar herbicidas con modos de acción diferentes, retrasando de esta manera el desarrollo de malezas resistentes.

- *Elección del cultivar:* Involucra el uso de un cultivar más competitivo, con capacidad de establecerse rápidamente y de forma más vigorosa. Es uno de los métodos más económicos con la desventaja que suele poseer un rendimiento potencial del cultivo menor que el del cultivar estándar.
- *Preparación de suelos:* Existen ciertas situaciones en las que si se mejoran las condiciones del suelo aumentan las posibilidades de reducir la competitividad de las malezas. Conociendo el tipo de suelo, la biología y ecología de las malezas presentes, es posible planificar un manejo del suelo que favorezca al desarrollo del cultivo en detrimento de la maleza.
- *Fertilización:* Los cultivos y las malezas compiten por los nutrientes, algunos estudios demostraron que el agregado de estos puede beneficiar en mayor medida al cultivo si se los aplica de manera localizada.
- *Manejo de agua:* Un riego apropiado durante los estados de crecimiento del cultivo permitiría que éste crezca más rápido y vigorosamente, logrando que compita en mejores condiciones con la maleza. Sin embargo, es necesario controlar la forma de suministro de agua de riego dado que puede resultar una fuente de contaminación de semillas de malezas.
- *Densidad de siembra:* El aumento de las densidades de siembra de los cultivos permite que éstos aprovechen mejor y más rápido los recursos ambientales existentes aumentando su capacidad competitiva sobre la maleza. Esto puede conducir también a un mayor rendimiento del cultivo a costa de un aumento en los gastos de siembra.
- *Control mecánico:* Se trata de técnicas con las que se efectúa la remoción de malezas mediante alguna herramienta de labranza. La principal desventaja son los efectos negativos sobre el desarrollo del cultivo y sobre las propiedades del suelo (erosión).
- *Control químico:* Se refiere al uso de herbicidas para el control de malezas. Es uno de los principales métodos de control dentro del MIM por ser una de las

técnicas más eficaces. Sin embargo, son los que ocasionan el mayor daño medioambiental, sobre todo si no se los utiliza responsablemente. Para ello es importante usar en forma secuencial herbicidas con distintos modos de acción de manera de evitar generar resistencia por parte de las malezas. Idealmente, cada componente de una mezcla de herbicidas debería tener un modo de acción diferente con un alto grado de efectividad contra las malezas problemáticas.

- *Control biológico*: Se trata de la aplicación de agentes que poseen modos de acción de control biológico sobre las malezas, como por ejemplo: insectos, nematodos, hongos, virus, aves y mamíferos. El método más exitoso hasta el momento ha sido utilizar insectos que provocan cierta destrucción de las malezas al defoliarlas, penetrar en sus tallos o raíces, comer sus semillas o formar agallas en los órganos reproductivos. Sin embargo, el control biológico per se no ha tenido un impacto importante en la agricultura extensiva debido a la alta especificidad requerida entre huésped y hospedante, lo que restringe el uso de biocontroladores en grandes superficies.

En Argentina se ha demostrado que los métodos culturales, tales como el aumento de la densidad del cultivo, la reducción del espaciamiento entre hileras o los cultivares altamente competitivos podrían reforzar eficazmente el rendimiento de los cultivos (Scursoni et al., 1999; Scursoni y Satorre, 2005). Sin embargo, las prácticas basadas en el MIM son bastante incipientes en los cultivos de cereales de invierno de nuestro país (Scursoni et al., 2019).

1.4. Sistemas de soporte a la toma de decisiones agronómicas

La cuantificación del costo/beneficio de las diferentes estrategias de MIM no resulta sencilla debido a la gran cantidad de información requerida y a la dificultad para su sistematización y uso en un marco decisorio apropiado.

En este contexto, los Sistemas de Soporte a la toma de Decisiones (SSD) se presentan como herramientas valiosas a la hora de seleccionar el conjunto más adecuado de estrategias para resolver un determinado escenario de planificación del manejo de malezas. Los SSD se definen como programas computacionales que, combinando el conocimiento de expertos, modelos de simulación y bases de datos, asisten en el proceso de toma de decisiones al ofrecer, de manera más o menos automática, una serie de recomendaciones u opciones. El principal objetivo de los SSD es mejorar la calidad, el tiempo y la eficiencia con que se toman las decisiones relacionadas al manejo de malezas (Chantre y González-Andújar, 2020) al proporcionar, de manera sintética, un análisis que integra una cantidad de información muy diversa.

Entre los componentes más importantes que conforman algunos tipos de SSD se encuentran los modelos matemáticos de simulación. Algunos modelos agronómicos permiten predecir teóricamente, a lo largo de un período de varios años, la dinámica de las poblaciones de malezas y los rendimientos de los cultivos como consecuencia de la aplicación combinada de las diferentes estrategias que conforman la caja de herramientas del MIM. De esta manera, el usuario podría obtener información del sistema cultivo-maleza al estudiar diversos escenarios y evaluar, de todos los casos simulados, cuál o cuáles son las mejores estrategias a implementar.

A continuación, se proporciona un panorama de la bibliografía referente a los modelos de simulación agronómica orientados específicamente al MIM.

1.5. Marco teórico

Se realizó una revisión bibliográfica teniendo en cuenta los SSD y modelos de simulación multianual para el MIM, publicados en revistas con referato de los últimos 10 años (2012-2022).

En Beltran et al. (2012) se evaluó la viabilidad bioeconómica de 49 estrategias de manejo integrado de *Echinochloa crus-galli* en los sistemas de cultivo de arroz de Filipinas. EL SSD implementado se denomina RIM-Phil, basado en su precursor australiano RIM (Ryegrass Integrated Weed Management model). RIM es un SSD que considera un gran número de combinaciones de tratamientos químicos y prácticas agronómicas con el fin último de poder estimar la dinámica del enmalezamiento y los resultados económicos de las diferentes estrategias de intervención sobre el raigrás anual en el largo plazo en Australia (Monjardino et al., 2003; Pannell et al., 2004; Australian Herbicide Resistance Initiative, 2023). La herramienta se encuentra actualmente disponible para los usuarios en una página web de acceso libre⁶. Su homónimo, RIM-Phil es útil para evaluar las estrategias de manejo de *Echinochloa crus-galli* y el impacto sobre la rentabilidad del cultivo. Las estrategias evaluadas fueron: control químico, control mecánico, rotación de cultivos y variedades de arroz resistentes a herbicidas. Se evaluaron los resultados de dichas estrategias en escenarios de hasta 20 años, teniendo en cuenta los resultados bioeconómicos, pero sin consideraciones explícitas de impacto ambiental. Los resultados demostraron la importancia de combinar métodos químicos y no químicos para reducir y mantener bajos niveles poblacionales de la maleza, y obtener mejores resultados agronómicos y económicos a largo plazo. El estudio también destacó la importancia de considerar los costos a largo plazo de las diferentes estrategias de manejo de malezas, en lugar de solo los costos inmediatos. La estrategia de integración del control químico, mecánico y cultural tuvo un costo inicial más alto que las otras estrategias, pero a largo plazo resultó en una reducción significativa del costo de producción y en un aumento del rendimiento del cultivo.

En Colbach et al. (2014), se propone un modelo tridimensional de competencia cultivo/maleza, para asistir al manejo integrado, principalmente mediante patrones de siembra de cultivos. El modelo denominado FlorSys se basa parcialmente en modelos

⁶ <https://www.ahri.uwa.edu.au/our-research/wim-weed-management-models/rim-ryegrass-integrated-management/> (Página web, accedido marzo 2023)

desarrollados anteriormente por Colbach et al. (2006) y Gardarin et al. (2012). Este estudio se centra en evaluar la eficiencia de diferentes patrones de siembra en el manejo de malezas. El modelo se basa en la interacción 3D entre las plantas de cultivo y las malezas, y tiene en cuenta factores como la densidad y profundidad de siembra y la distancia entre hileras. Se realizaron simulaciones de 10 años de duración, con 16 malezas anuales en competencia con colza/trigo/cebada en rotación. Luego, se comparó el rendimiento de los cultivos y los niveles de infestación, sin cuantificar el impacto ambiental ni los resultados económicos. Particularmente, en Colbach et al., 2014, se utilizó el modelo para comparar dos patrones de siembra alternativos (siembra en franjas y siembra en parches) vs patrón de siembra convencional, evaluándose la capacidad para controlar malezas y maximizar el rendimiento del cultivo. Los resultados mostraron que tanto la siembra en franjas como la siembra en parches redujeron significativamente la densidad de malezas y mejoraron el rendimiento del cultivo en comparación con la siembra convencional. Los resultados fueron consistentes con ensayos realizados a campo. En general, este trabajo destaca la importancia de la innovación en el MIM y muestra cómo un modelo de competencia en tres dimensiones puede ser una herramienta útil para evaluar la eficacia de diferentes estrategias de manejo integrado.

Lacoste y Powles (2014) presentan una mejora y actualización del SSD RIM desde el punto de vista del usuario final. El objetivo del trabajo es mejorar los esfuerzos de integración del manejo integrado de malezas en sistemas de cultivo, revisar y actualizar las medidas de manejo utilizadas y facilitar la adaptación a otras especies y regiones. Los autores del trabajo agregaron nuevos métodos de control de malezas y se revisaron los métodos existentes para asegurar que el SSD reflejara con mayor precisión las opciones de control de malezas que se utilizaban actualmente. En el trabajo se realizaron simulaciones de 10 años de duración para demostrar las capacidades del SSD.

Lindsay et al. (2017) presentaron un SSD para el control a largo plazo de *Amaranthus palmeri*, una maleza causante de grandes pérdidas económicas a los cultivos de soja y algodón en EUA con resistencia múltiple a herbicidas. El SSD adaptado

del RIM denominado PAM-RIM se desarrolló a partir de estudios de bioecología de la maleza en el sur de Estados Unidos. El software proporciona información sobre el riesgo de resistencia, el rendimiento del cultivo, la rentabilidad y la dinámica del banco de semillas del suelo, en un horizonte de planificación de 10 años. Para probar la efectividad del sistema, se compararon los resultados de las prácticas recomendadas por el sistema con las prácticas tradicionales utilizadas por los agricultores, luego se evaluó la efectividad y el costo de cada estrategia. Los resultados mostraron que el sistema PAM identifica estrategias que mejoran significativamente la efectividad y el costo del control de *A. palmeri* a largo plazo en comparación con las prácticas tradicionales.

En Sønderskov et al. (2020) se presenta otra adaptación del RIM, el DK-RIM (Denmark-Ryegrass Integrated Management) como un SSD para el manejo de *Lolium multiflorum*, en los agrosistemas dinamarqueses de producción de cereales. Al igual que el RIM desarrollado por Pannell et al. (2004), se basa en la simulación multianual de la maleza en competencia con el cultivo y el impacto de las medidas de manejo seleccionadas sobre los resultados agronómicos y económicos a largo plazo. En su versión actual, el sistema no cuantifica el impacto ambiental. El DK-RIM se encuentra actualmente disponible de forma gratuita para los usuarios⁷, y ha sido evaluado satisfactoriamente por productores y asesores. En el trabajo se encontró que el aumento en la diversidad en la rotación de cultivos, y en menor medida el atraso de la fecha de siembra de trigo, fueron efectivas para reducir el impacto de *L. multiflorum* sobre los cultivos.

Burns et al. (2018) proponen un modelo estocástico de dinámica poblacional de *Avena fatua* como un enfoque para ayudar a seleccionar alternativas de manejo de la resistencia múltiple en EUA. Si bien este trabajo no cuenta con la premisa de enfocarse en el MIM, se considera relevante debido a sus características y originalidad. El modelo demográfico se construyó utilizando datos de campo recopilados en ensayos

⁷https://www.landbrugsinfo.dk/public/4/0/f/plantebeskyttelse_dk_rim_varktoj_bekampelse_italiensk_rajgras (Página web, accedido marzo 2023)

experimentales durante 3 años y en un amplio rango de condiciones ambientales. Se investigó la influencia de la fertilización nitrogenada, y la densidad de siembra del trigo sobre la demografía de poblaciones de *A. fatua* susceptibles y con resistencia múltiple bajo dos sistemas de cultivo (monocultura vs rotación de cultivo). El modelo utiliza ecuaciones matemáticas que representan las tasas de supervivencia, crecimiento y reproducción de la maleza en diferentes condiciones de manejo. En particular, se evaluó la capacidad del modelo para predecir el impacto de diferentes estrategias de manejo sobre la dinámica poblacional y la resistencia. El modelo demográfico muestra que reiteradas aplicaciones de herbicidas selectivos, generan presión de selección y pueden incrementar la selección de biotipos con resistencia múltiple. Además, el modelo demuestra que la rotación de cultivos y las estrategias de manejo basadas en principios bioecológicos pueden reducir la presión de selección y prevenir la aparición de resistencia, mejorando el abordaje del manejo a largo plazo y extendiendo el tiempo de uso de los herbicidas disponibles en la actualidad.

D'Amico et al. (2021) modelizan los efectos de la densidad de siembra de cebada sobre el MIM en raigrás anual en zonas mediterráneas de clima seco. El estudio relaciona un modelo anual del ciclo de vida para *Lolium rigidum* desarrollado previamente por Gonzalez-Andujar y Fernandez-Quintanilla (2004) combinado con un modelo de desarrollo de cultivo de cebada para estudiar el efecto del MIM sobre el cultivo y la maleza. Particularmente el estudio analiza la efectividad de diferentes prácticas de manejo, haciendo énfasis en la densidad de siembra de la cebada, incluyendo también el uso de herbicidas y labranza, pero sin cuantificar índices económicos ni ambientales. Los resultados demuestran la importancia de la combinación de distintas estrategias en condiciones de alta infestación, y del MIM para reducir y mantener una baja densidad de malezas y mejorar el rendimiento del cultivo.

En conclusión, como se ha expuesto en esta sección, la mayoría de los modelos de simulación multianual y SSD para el MIM se basan en el uso de herramientas previamente desarrolladas, aunque también se han generado nuevas. De los trabajos revisados, solo Colbach et al. (2014) cuenta con una simulación de paso diario y una

aproximación en 3D que ofrece características interesantes para futuros desarrollos. El resto de los trabajos mantiene una discretización anual. En cuanto al horizonte de simulación, la mayoría de los estudios se enfocan en periodos de 10 años, y en algunos casos presentan simulaciones de muy largo plazo (20 años). Respecto a la competencia intra e interespecífica, los trabajos realizan aproximaciones denso-dependientes al finalizar la temporada agronómica, sin discriminar los estados fenológicos de la maleza ni el desarrollo del cultivo. La competencia intraespecífica se tiene en cuenta principalmente para calcular la fecundidad y/o producción de semillas de la maleza. No obstante, Colbach et al. (2014) presentan un trabajo excepcional donde se centra en simular detalladamente la competencia por luz a nivel del canopeo del cultivo. Con respecto al banco de semillas de la maleza, se simula en todos los trabajos, con mayor o menor nivel de detalle según el caso de estudio particular. La información meteorológica diaria solo se utiliza en el trabajo de Colbach et al. (2014), mientras que los demás trabajos solo incluyen información anual o directamente no incluyen dicha información. En cuanto a las medidas de manejo, se observa una gran variedad de situaciones en los distintos trabajos, siendo las medidas de manejo cultural las estrategias más útiles para disminuir los niveles poblacionales de las malezas sin ejercer un impacto negativo de relevancia sobre los índices agronómicos o económicos. Aunque más de la mitad de la literatura evaluada realiza una evaluación económica en su simulación, no se ha incorporado de forma directa la evaluación del impacto ambiental en ninguno de los trabajos revisados.

1.6. El modelo propuesto

En general, los modelos existentes pueden adaptarse en cierta medida para investigar sistemas que van más allá de su ámbito original. Por ejemplo, como se ha descrito en la sección precedente, el sistema RIM ha sido adaptado exitosamente a agrosistemas diferentes para el que fuera desarrollado originalmente. Sin embargo, las adaptaciones no suelen ser sencillas y conllevan típicamente grandes esfuerzos de programación, incluso cuando los códigos de origen están disponibles. Se consideró la

posibilidad de adaptar RIM para los fines de este proyecto, pero se encontraron varias limitaciones.

- i. RIM no posee una discretización diaria, lo que dificulta:
 - a. Incorporar información experimental de diversas fuentes.
 - b. Incorporar más de un cultivo por campaña o cultivos de cobertura.
 - c. La simulación de más de una maleza en competencia.
 - d. La incorporación de perfiles de emergencia detallados.
 - e. Simular el efecto sobre la dinámica poblacional y la producción de semillas de diversas estrategias de manejo (culturales, físicas y métodos de control innovadores).
- ii. RIM no tiene en cuenta el efecto del clima en los análisis. Si bien no es sencillo incluir este elemento en periodos de estudio que involucran varios años, la fluctuante situación climática de la región bajo estudio requiere de la consideración de dicha variable como parte de los escenarios productivos.
- iii. RIM no posee un módulo de evaluación de impacto ambiental. El empleo de herbicidas como práctica habitual de control hace que resulte imprescindible incluir una estimación de indicadores ambientales.

En este trabajo de tesis se apuntó a desarrollar un enfoque de modelado flexible, que se espera se adapte a la simulación de distintos cultivos y malezas para evaluar estrategias de manejo integrado. Una de las principales características del enfoque propuesto es la discretización diaria de la línea de tiempo, compatible con la mayoría de los procedimientos agronómicos y de disponibilidad de datos de campo. En este sentido, este trabajo integra diversos enfoques de modelado producidos dentro del grupo de investigación en malezas del Dpto. de Agronomía UNS en colaboración con actores locales incluyendo estudios agronómicos de extensa duración.

Desde una perspectiva agronómica práctica, un modelo orientado al desarrollo de un SSD debe incluir la demografía de los cultivos y las malezas, así como los elementos

ecofisiológicos intervinientes que finalmente definirán el rendimiento de los cultivos al final del ciclo y la densidad de las malezas durante el proceso. El modelo propuesto en esta tesis permite simular las interacciones competitivas entre una maleza y un cultivo. Para el desarrollo de la maleza, se representan los siguientes procesos: (i) la dinámica poblacional diaria, describiendo la composición numérica de los diferentes estados fenológicos, (ii) la competencia intra e interespecífica, (iii) la producción de semillas, y (v) el efecto de los diferentes métodos de manejo de la maleza. Para el desarrollo del cultivo, las variables calculadas son (i) Índice de Área Foliar (IAF), (ii) efecto competitivo del cultivo sobre la maleza, y el (iii) rendimiento esperado en función de la competencia maleza-cultivo.

El modelo se desarrolló en colaboración con extensionistas del INTA, quienes aportaron información de campo imprescindible para ajustar los parámetros numéricos y contribuyen a la etapa de validación a campo en el marco de los programas de toma de decisión.

1.7. Hipótesis y objetivos

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo general el desarrollo de un modelo de simulación cultivo-maleza que permita estimar, a corto, mediano y largo plazo, la dinámica poblacional de la maleza en interacción competitiva con el cultivo bajo distintos escenarios de manejo integrado. El modelo también deberá ser lo suficientemente flexible para poder adecuarse a las particularidades de distintos agrosistemas regionales. Dicho modelo deberá incluir módulos de cuantificación de índices económicos, agronómicos y medioambientales que permitan una evaluación de las diferentes estrategias de manejo y faciliten la toma de decisiones para el MIM.

A partir del objetivo general planteado surgen las siguientes hipótesis:

- Es factible desarrollar un modelo matemático de simulación adaptable a distintos agrosistemas que represente la interacción cultivo-maleza con un paso diario.
- El modelo permite comparar y seleccionar estrategias de manejo de malezas en escenarios de simulación anual y multianual a través de variables agronómicas, económicas y ambientales

A partir de las hipótesis específicas se plantean los siguientes objetivos particulares:

1.8. Objetivos específicos

1. Elaborar un modelo matemático de interacción cultivo-maleza, que posea una flexibilidad y simplicidad tal que sea fácilmente adaptable a las particularidades de distintos agrosistemas regionales.
2. Formular módulos de cálculo adicionales que permitan cuantificar los resultados agronómicos, económicos y ambientales asociados a los métodos de manejo simulados.
3. Ajustar los parámetros y validar el modelo desarrollado con información experimental de distintos sistemas agrícolas de interés regional.

A continuación, se detalla brevemente la estructura de esta tesis:

En el Capítulo 2, se describe el modelo de simulación del sistema cultivo-maleza desarrollado. En específico, se describen las variables y ecuaciones utilizadas, se detallan los parámetros necesarios para su ejecución y se presentan casos demostrativos.

En el capítulo 3, se describe la adaptación del modelo a los cultivos trigo y cebada, en competencia con *Avena fatua* y se presentan cinco casos de estudio para determinar y comparar las consecuencias económicas y ambientales de diferentes estrategias de manejo aplicadas a agrosistemas del sudoeste bonaerense.

En el capítulo 4, se describe la adaptación del modelo al cultivo de soja, en competencia con la maleza *Euphorbia davidii* Subils y se presentan varios casos y subcasos de estudio para determinar y comparar las consecuencias económicas y ambientales de diferentes estrategias de manejo aplicadas a agrosistemas del centro bonaerense.

Por último, en el Capítulo 5 se presentan las discusiones y conclusiones generales de la tesis y se plantea el trabajo a futuro según la experiencia obtenida durante su desarrollo.

CAPÍTULO 2

Materiales y Métodos

En el presente capítulo se describe el modelo de simulación propuesto. El mismo es de propósito general y potencialmente adaptable a diferentes sistemas de rotación maleza-cultivo. El modelo desarrollado permite simular diferentes escenarios de manejo de malezas dentro de un horizonte de planificación plurianual (táctico/estratégico) utilizando un paso de tiempo diario para el cálculo de las variables dentro de la temporada agronómica. Un paso de tiempo diario proporciona un alto nivel de detalle siendo compatible con la recopilación de datos agronómicos en tiempo real y las previsiones meteorológicas.

Un horizonte de simulación plurianual permite la visualización e interpretación de los efectos a mediano y largo plazo de las decisiones a implementar para un manejo racional de malezas. Para varios de los procesos considerados (emergencia, producción de semillas, acciones de manejo, evaluación económica, banco de semillas, evaluación de impacto ambiental) este enfoque sigue las aproximaciones adoptadas en estudios previos de modelado de malezas reportados en la literatura. En otros casos, como ser la dinámica poblacional de la maleza y la competencia intraespecífica, se introdujeron innovaciones para lograr una descripción más detallada de los procesos bioecológicos. El modelo descrito ha sido programado en Microsoft Excel®/ Visual Basic.

Al final del capítulo se presentan simulaciones de casos demostrativos con el objetivo de facilitar la comprensión de las aproximaciones adoptadas y las relaciones entre los componentes del modelo.

2.1 Descripción general del sistema maleza-cultivo

En la Figura 2.1 se presenta el esquema general del modelo de simulación propuesto considerando un sistema compuesto por una maleza anual y un cereal de invierno.

Las variables y parámetros del modelo se detallan en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3.

En las siguientes secciones se describen en detalle los diferentes subprocesos involucrados.

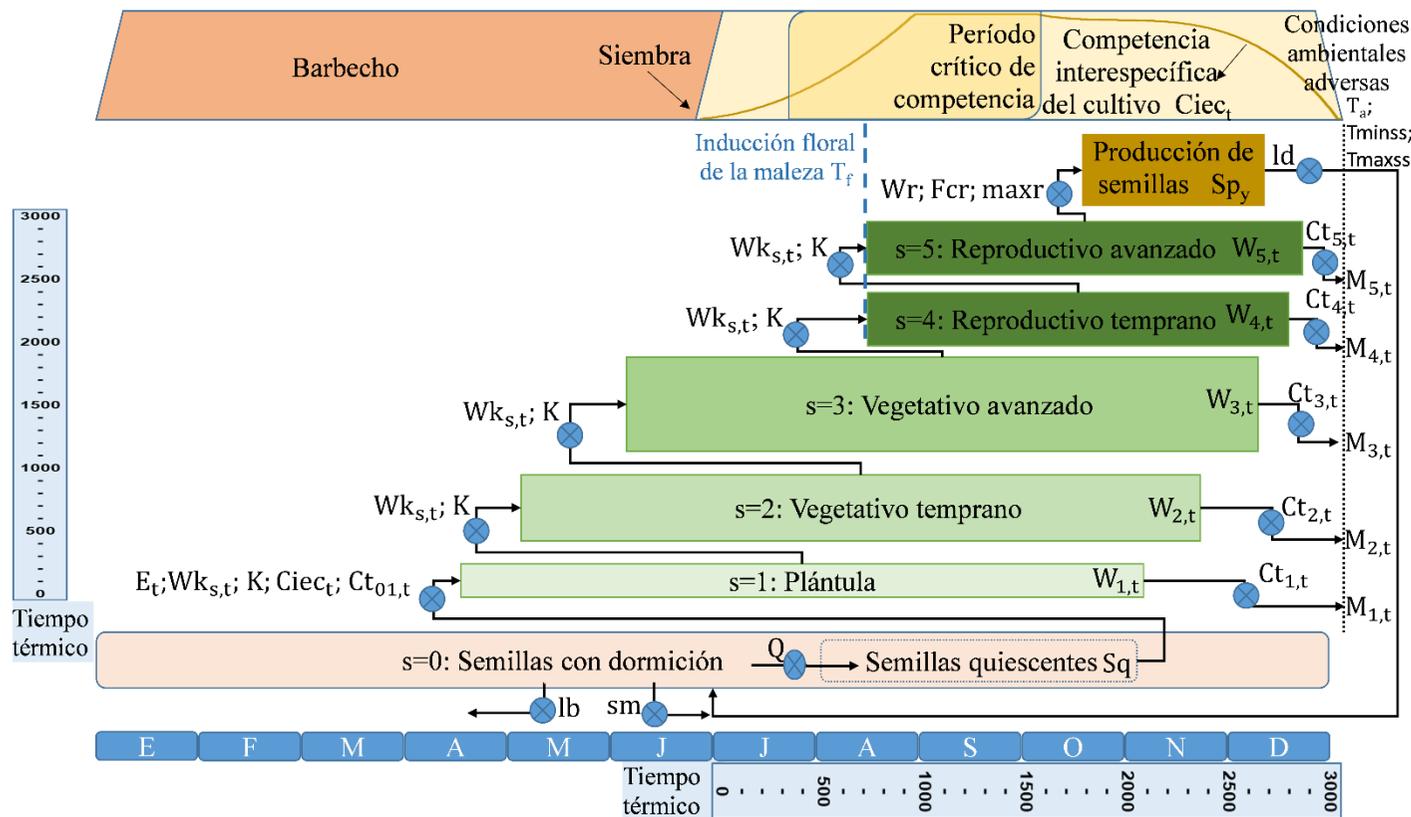


Figura 2.1. Diagrama general ilustrando los principales componentes del modelo de simulación, considerando una especie de maleza que compite con un cultivo a lo largo de una campaña agrícola (ver Tablas 2.1-2.3 para descripción de variables y parámetros). Sobre la izquierda se observa la escala de tiempo-térmico utilizada para guiar el desarrollo de la maleza. En la base se observan escalas de tiempo-térmico y cronológico utilizadas para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Sobre la parte superior se observa una clara distinción entre los momentos de barbecho y cultivo. En el ciclo de cultivo se detallan momento de siembra,

período crítico de competencia (PCC) e índice de competencia interespecífica del cultivo ($Ciec_t$). El ciclo de vida de la maleza se representa de una manera simplificada definiendo las variables de los estados más representativos ($W_{s,t}$), siendo s=0: Banco de semillas; s=1: Plántula (1 hoja verdadera); s=2: Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas); s=3: Vegetativo avanzado (macollaje); s = 4: Reproductivo inicial (floración); s = 5: Reproductivo avanzado (dispersión de semillas).

Tabla 2.1. Variables del modelo de simulación maleza-cultivo.

Variables	Descripción	Unidades
t	Día juliano	Día jul.
y	Año o campaña	-
s	Estado fenológico de la maleza	-
$W_{s,t}$	Densidad acumulada de individuos en s, en t	$i.m^{-2}$
$I_{s,t}$	Cohorte diaria de individuos que ingresan en s, en t	$i.m^{-2}$
$O_{s,t}$	Cohorte diaria de individuos que egresan de s, en t	$i.m^{-2}$
$M_{s,t}$	Conjunto de individuos eliminados por acciones de control y/o condiciones climáticas adversas en s, en t	$i.m^{-2}$
θ_t	Tiempo-térmico acumulado en t	$^{\circ}Cd$
T_t	Temperatura media diaria en t	$^{\circ}C$
$Tmin_t$	Temperatura mínima diaria en t	$^{\circ}C$
$Tmax_t$	Temperatura máxima diaria en t	$^{\circ}C$
PP_t	Precipitación diaria en t	mm
Sq	Semillas quiescentes (sin dormición)	$s.m^{-2}$
S_y	Semillas quiescentes provenientes de y	$s.m^{-2}$
Sp_y	Producción total de semillas en y	$s.m^{-2}$
E_t	Individuos que emergen en t	$i.m^{-2}$
$ia_{s,t}$	Competencia intraespecífica de la maleza, sobre s, en t	-
$Wk_{s,t}$	Densidad ponderada de malezas entre s y ns en t	-
$Ciec_t$	Índice de competencia interespecífica del cultivo, en t	-
LAI_t	Índice de área foliar del cultivo en t	-
r	Grupo de cohortes reproductivas	-
W_r	Densidad de malezas en r	$i.m^{-2}$
Yld	Rendimiento esperado del cultivo (como proporción del rendimiento libre de malezas)	-
WC	Competencia interespecífica de la maleza sobre el cultivo	-
$MC_{s,t}$	Número de individuos eliminados por acciones de control en s, en t	$i.m^{-2}$
$Ct_{s,t}$	Tasa de mortalidad por control en s, en t	-
$M_stress_{s,t}$	Número de individuos afectados por condiciones climáticas adversas en s, en t	$i.m^{-2}$
$Cr_{01,t}$	Tasa de mortalidad sobre el estado de pre-emergencia por control residual en t	-

Tabla 2.2. Parámetros del modelo de simulación maleza-cultivo.

Parámetro	Descripción	Unidades
ns	Número de estados fenológicos	-
T _b	Temperatura base cardinal para la acumulación de tiempo-térmico	°C
Th ₁	Tiempo-térmico requerido por una cohorte diaria para pasar de s=1 a s=2 (plántula a 2-4 Hojas)	°Cd
Th ₂	Tiempo-térmico requerido por una cohorte diaria para pasar de s=2 a s=3 (2-4 Hojas a Macollaje)	°Cd
Th ₃	Tiempo-térmico requerido por una cohorte diaria para pasar de s=3 a s=4 (Macollaje a Reproductivo inicial)	°Cd
Th ₄	Tiempo-térmico requerido por una cohorte diaria para pasar de s=3 a s=4 (Reproductivo inicial a avanzado)	°Cd
t _f	Día de inducción floral	Día juliano
L	Longevidad del banco de semillas	Años
Q ₁	Proporción de semillas producidas en y= -1 que se encuentran quiescentes en y = 0	-
Q ₂	Proporción de semillas producidas en y= -2 que se encuentran quiescentes en y = 0	-
Q ₃	Proporción de semillas producidas en y= -3 que se encuentran quiescentes en y = 0	-
sm	Tasa de mortalidad anual del banco de semillas	-
ld	Tasa de pérdida de semillas al momento de la dispersión natural	-
lb	Tasa de pérdida de semillas por factores bióticos durante el primer barbecho (predación, mortalidad)	-
K	Capacidad de porte del agroecosistema	i.m ⁻²
iam	Tasa de mortalidad por competencia intraespecífica	-

Tabla 2.2. Parámetros del modelo de simulación. (Continuación)

Parámetro	Descripción	Unidades
f_1	Factor de competencia para $s=1$	-
f_2	Factor de competencia para $s=2$	-
f_3	Factor de competencia para $s=3$	-
f_4	Factor de competencia para $s=4$	-
f_5	Factor de competencia para $s=5$	-
T_a	Día o rango de días en donde se producen condiciones ambientales adversas	Día juliano
T_{minss}	Temperatura mínima diaria que causa estrés térmico	°C
T_{maxss}	Temperatura máxima diaria que causa estrés térmico	°C
m_{stress_1}	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en $s=1$	-
m_{stress_2}	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en $s=2$	-
m_{stress_3}	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en $s=3$	-
m_{stress_4}	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en $s=4$	-
m_{stress_5}	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en $s=5$	-
nr	Número de grupos de cohortes reproductivas	-
F_{c_1}	Fecundidad individual del grupo de cohortes reproductivas 1	semillas.m ⁻²
F_{c_2}	Fecundidad individual del grupo de cohortes reproductivas 2	semillas.m ⁻²
max_1	Máxima producción de semillas de la cohortes reproductivas 1	semillas.m ⁻²
max_2	Máxima producción de semillas de la cohortes reproductivas 2	semillas.m ⁻²

Tabla 2.3. Parámetros de los cultivos.

Parámetro	Descripción	Unidades
PCC	Período crítico de competencia del cultivo	-
Sf_t	Susceptibilidad del cultivo entre el día 0 y el día t, previo al PCC	-
Sf_t	Susceptibilidad del cultivo durante los días t del PCC	-
Sf_t	Susceptibilidad del cultivo entre el día t, posterior al PCC y el día 365	-
LAIhc	Valor de TPLA que representa una situación de alta competencia	-
Myl	Máxima proporción de pérdida de rendimiento	-
a	Constante derivada del cultivo	-
k	Constante de competencia del cultivo	-
GY	Rendimiento esperado	Kg.ha ⁻¹

2.2 Banco de semillas

La dinámica del banco de semillas de las malezas es un proceso complejo (Batlla et al., 2020). El proceso comienza con la dispersión de semillas por los individuos que logran completar el ciclo reproductivo. A partir de las semillas producidas, se contabilizan las pérdidas debidas a factores abióticos (germinación a campo, mortalidad fisiológica) y bióticos (predación, mortalidad y longevidad). Se considera que el banco de semillas está compuesto por dos fracciones de semillas: semillas con dormición y semillas quiescentes (sin dormición). Así, la fracción del banco de semillas capaz de producir nuevas plántulas cada día calendario se estima a partir de la parte quiescente. La dinámica del banco de semillas se representa mediante la siguiente Ecuación:

$$Sq = \sum_{y=-L}^{-1} (Sp_y [(1-l_d)(1-l_b) Q_y (1+(sm \cdot y))]) \quad (2.1)$$

donde Sq representa el número de semillas quiescentes al comienzo de la temporada de cultivo ($y=0$) en semillas.m⁻² y L es la longevidad del banco de semillas, en años o campañas. La expresión matemática integra las semillas quiescentes de L años anteriores al inicio de la temporada actual. Sp_y es la producción total de semillas correspondiente al año y; l_d es la tasa de pérdida de semillas por dispersión; l_b es la tasa de pérdida de semillas por factores bióticos durante el barbecho; Q_y es la proporción de semillas producidas en y que son quiescentes en $y=0$ y sm es la tasa de mortalidad anual del banco de semillas.

2.3 Emergencia a campo

Uno de los principales elementos para una adecuada planificación del control de malezas es la posibilidad de estimar los flujos de emergencia a campo con aceptable precisión (Royo-Esnal et al., 2020). La estimación de la proporción del banco de semillas que emerge cada día se realiza típicamente empleando variables que describen las condiciones microclimáticas de suelo (Spokas y Forcella, 2009).

La mayoría de los modelos de emergencia suelen ser regresiones no lineales tipo sigmoideal o logística (Gonzalez-Andujar et al., 2016), aunque también se han propuesto modelos basados en otras técnicas, por ejemplo, las Redes Neuronales Artificiales (Chantre et al., 2012, 2014, 2018).

La ventaja de las redes neuronales es que poseen una estructura flexible y escalable. En particular, los modelos de redes neuronales empleados en este trabajo utilizan directamente los datos meteorológicos (temperaturas mínimas y máximas diarias; precipitación diaria) para la predicción de la emergencia diaria relativa (E_t), expresada como proporción del total de semillas quiescentes S_q (Chantre et al., 2018).

2.4 Dinámica poblacional de la maleza

La demografía de la maleza se simula mediante cohortes diarias. Cada cohorte está representada por los individuos que emergen simultáneamente en un día juliano determinado. Los individuos de cada cohorte pasan por diferentes estados fenológicos durante el ciclo de vida de la maleza (Figura 2.1, rectángulos verdes). Los estados fenológicos típicos considerados en este trabajo son: $s=1$: Plántula (1 hoja verdadera); $s=2$: Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas); $s=3$: Vegetativo avanzado (macollaje); $s=4$: Reproductivo inicial (floración); $s=5$: Reproductivo avanzado (dispersión de semillas).

El balance demográfico de la maleza viene dado por:

$$W_{s,t+1} = W_{s,t} + I_{s,t} - O_{s,t} - M_{s,t} \quad \forall s, \forall t \quad (2.2)$$

donde $W_{s,t}$ es la densidad acumulada (individuos.m⁻²) en un estado fenológico determinado (s) en un día determinado (t); $I_{s,t}$ son las cohortes entrantes (las cohortes que abandonan el estado anterior para pasar al estado s) (s,t); $O_{s,t}$ son las cohortes salientes de s, t (las cohortes que abandonan el estado s para pasar al estado posterior);

$M_{s,t}$ es la suma de los individuos eliminados por acciones de control y estrés térmico en s,t .

La lógica adoptada en esta tesis para simular la dinámica diaria de las diferentes cohortes se representa en las Figs. 2.2 y 2.3. Como se observa en la Figura 2.2, el proceso comienza con la cohorte A que ingresa al estado s en $t = 1$ ($I_{s,1}$). La cohorte A requiere un determinado tiempo térmico para pasar de s a $s+1$ (representado como Th_s , ver flujo de $I_{s,1}$ a $O_{s,3}$). Una vez cumplido el requisito de Th_s , la cohorte A se ve afectada por la competencia intraespecífica ($ia_{(s+1),3}$) y entonces, una nueva cohorte A' conforma el siguiente estado ($s+1$). Para el caso de las cohortes adicionales B y C, que ingresan en días diferentes ($I_{s,2}$ e $I_{s,3}$ respectivamente), la transición al siguiente estado se produce simultáneamente ($O_{s,5}$) en el ejemplo considerado. Es evidente que, los Th_s necesarios para la transición de s a $s + 1$ son los mismos para todas las cohortes iniciales, pero el ritmo de acumulación de Th_s suele ser diferente para cada una, dependiendo de las condiciones meteorológicas (ver magnitud de las flechas dobles en Figura 2.2).

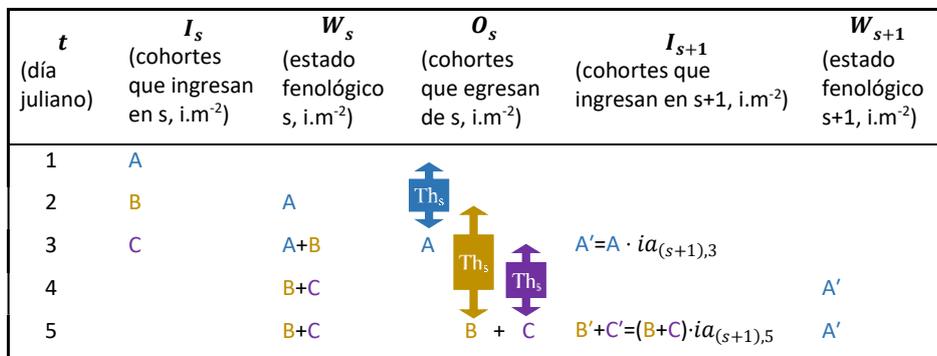


Figura 2.2. Diagrama ejemplificador de los flujos de cohortes entre estados fenológicos (ver tabla 2.1 para obtener una descripción de los términos).

t (día juliano)	I_s (cohortes que ingresan en s , $i.m^{-2}$)	W_s (estado fenológico s , $i.m^{-2}$)	O_s (cohortes que egresan de s , $i.m^{-2}$)
10	D		
11	E	D	
12		$D+E-M_{s,12}$	$D' = D \cdot (1-Ct_{s,12})$
13		$E-(M_{s,12}-D \cdot Ct_{s,12})$	$E' = E \cdot (1-Ct_{s,12})$

Figura 2.3. Diagrama ejemplificador de la dinámica de control y flujos de cohortes (ver Tabla 2.1 para obtener una descripción de los términos).

En la Figura 2.3, se ilustra una acción de control en $t = 12$ sobre los individuos de $W_{s,12}$ ($D + E$). La cohorte D se ve afectada por la tasa de control ($Ct_{s,12}$) que genera la cohorte D' . En $t = 13$, la misma lógica se aplica a la cohorte E .

La estimación de las cohortes entrantes ($I_{s,t}$) en $s = 1$ (plántula) en t se obtiene como:

$$I_{1,t} = Sq \cdot E_t \cdot ia_{1,t} \cdot (1 - Ciec_t) \cdot (1 - Ct_{01,t}) \quad \forall t \quad (2.3)$$

donde $I_{1,t}$ son las cohortes entrantes en $s = 1$, t (es decir, grupo de cohortes que entran en $W_{1,t}$); Sq es la cantidad de semillas quiescentes; E_t es la proporción de plántulas emergidas en t ; $ia_{1,t}$ es la competencia intraespecífica de la maleza (expresada como tasa de supervivencia) en $s = 1$, t ; $Ciec_t$ representa el índice de competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza en t ; $Ct_{01,t}$ es la mortalidad de la maleza durante la transición entre las semillas germinadas y la fase de plántula (s entre 0 y 1), en t .

Para cada estado fenológico, se requiere una determinada acumulación de grados día (expresado como Th_s) para lograr la transición al siguiente estado. Se utiliza la ecuación propuesta por Begon y col. (2006) para la acumulación de $^{\circ}Cd$ (Ecuación (2.4)).

$$\theta_{s,t} = \sum_{i=1}^n (T_{(t+i)} - T_b) \quad \forall s, \forall t \quad (2.4)$$

donde $T_{(t+i)}$ es la temperatura media diaria en $t + i$ y T_b es la temperatura cardinal base.

La ecuación (2.4) comienza con $I_{s,t}$ y opera diariamente hasta que se cumplen los requisitos ambientales para pasar al siguiente estado. La ecuación (2.5) describe este proceso:

$$\begin{cases} O_{s,(t+n)} = I_{s,t} (1 - Ct_{s,t}) \\ I_{(s+1),(t+n)} = O_{s,(t+n)} ia_{s,t} \end{cases} \quad \text{Si} \quad \theta_{s,t} \geq Th_s \quad \forall s, \forall t \quad (2.5)$$

donde $I_{(s+1),(t+n)}$ representa las cohortes entrantes en $(s + 1)$ en $(t + n)$; $O_{s,(t+n)}$ representa las cohortes salientes de s en $(t + n)$; $ia_{s,t}$ es la competencia intraespecífica expresada como tasa de supervivencia de la maleza, en s, t .

La ecuación (2.5) se aplica a todos los estados fenológicos. Para el pasaje al estado reproductivo inicial (representado como $s = 4$), también se requiere una condición ambiental adicional: el tiempo mínimo de inducción floral. Como se expresa en la Ecuación 2.6 los individuos en $s = 3$ (vegetativo avanzado) deben alcanzar un umbral de inducción floral para la transición a $s = 4$ (reproductivo inicial).

$$\begin{cases} O_{3,(t+n)} = I_{3,t} (1 - Ct_{3,t}) \\ I_{4,(t+n)} = O_{3,(t+n)} ia_{4,t} \end{cases} \quad \text{Si} \quad \theta_{3,t} \geq Th_3 \quad \& \quad t \geq t_f \quad \forall t \quad (2.6)$$

donde t_f es el tiempo de inducción floral (en días julianos).

2.5 Competencia intraespecífica de la maleza

Hasta donde sabemos, no se ha publicado previamente ningún modelo de competencia intraespecífica que incluya los estados fenológicos de la maleza. En este trabajo se ha considerado que la competencia intraespecífica depende tanto de la capacidad de carga del sistema (K) como de la "densidad ponderada de malezas" ($Wk_{s,t}$). Este novedoso enfoque se describe mediante las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$ia_{s,t} = \begin{cases} 1, & \text{Si } Wk_{s,t} < K \\ 1 - iam, & \text{Si } Wk_{s,t} \geq K \end{cases} \quad \forall s, \forall t \quad (2.7)$$

$$Wk_{s,t} = \sum_{i=s}^{ns} \{W_{i,t} \cdot f_i\} \quad \forall s, \forall t \quad (2.8)$$

donde $ia_{s,t}$ es la competencia intraespecífica expresada como tasa de supervivencia de la maleza en el estado s en el periodo t ; iam es la tasa de mortalidad por competencia intraespecífica; K es la capacidad de porte del agroecosistema; $Wk_{s,t}$ es la "densidad ponderada de malezas" desde el estado real s hasta ns en t , siendo ns el número de estados fenológicos simulados. $W_{s,t}$ es la densidad acumulada (individuos.m⁻²) en s y t , y f_s es el factor de competencia para s , que pondera la competencia según el estado fenológico de la maleza.

Entonces, los individuos que ingresan a un estado fenológico, se verán afectados por una tasa de supervivencia ($ia_{s,t}$) que depende de: los individuos presentes en dicho estado y en los estados superiores; la ponderación de la competencia que ejercen los individuos por su estados fenológico; y la capacidad de porte del sistema (K). Por ende, cuando la suma de la competencia de los individuos supera el valor preestablecido de K se activa el efecto de la tasa de supervivencia ($ia_{s,t}$).

2.6 Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza

Se propone simular el efecto competitivo del cultivo sobre la maleza ($Ciect_t$) como una tasa de supervivencia en $s = 1$ (Figura 2.1). La magnitud de $Ciect_t$ depende tanto de la densidad de siembra, como del Índice de Área Foliar (LAI por sus siglas en inglés) que representa la relación entre el área foliar y la superficie de terreno que cubre.

Para la simulación del LAI_t del cultivo, se utilizan ecuaciones ajustadas a partir de simulaciones en DSSAT. El modelo DSSAT se adapta al agrosistema seleccionado con: (i) información agrometeorológica; (ii) información genética y de manejo; y (iii)

un perfil de suelo representativo para la zona de estudio. A partir de los resultados de varios años de simulaciones en DSSAT, se estima el estado fenológico y se ajusta una función de LAI_t , según la acumulación de tiempo térmico del cultivo (D_t). La función de LAI_t se ajusta mediante parámetros de funciones polinómicas en Excel SOLVER®.

El parámetro LAI_{hc} , es utilizado como un valor límite máximo en la competencia cultivo-maleza. El valor de LAI_{hc} se ajusta manualmente, en función de las características del cultivo, como: capacidad competitiva, distanciamiento entre hileras, densidad y momento de siembra seleccionado.

Finalmente, a partir de los parámetros LAI_t y LAI_{hc} en función de D_t , se obtiene la magnitud de $Ciec_t$ que afecta a la maleza en el estado cotiledonar ($s=1$). Para el cálculo de $Ciec_t$ se propone aplicar la Ecuación 2.9.

$$Ciec_t = \min \left[\left(\frac{LAI_t}{LAI_{hc}} \right) \left(\frac{C_s}{C_a} \right); 1 \right] \quad \forall t \quad (2.9)$$

donde $Ciec_t$ es el índice de competencia interespecífica del cultivo, LAI_t es el LAI en t ; LAI_{hc} es un valor que representa un escenario de "alta competencia"; C_s es la densidad de siembra estándar del cultivo, y C_a es la densidad de siembra efectiva. La relación entre los valores de LAI y densidad de siembra determinan la mortalidad de los individuos de maleza en $s = 1$, como se describe en la Ecuación 2.3. La función mínimo establece que $Ciec_t$ está restringida entre 0 y 1.

2.7 Competencia interespecífica de la maleza sobre el cultivo

La interferencia de la maleza sobre el cultivo se considera mediante el cálculo del rendimiento esperado del cultivo, como proporción del rendimiento libre de malezas. Se adopta aquí la ecuación de rendimiento propuesta por Pannell et al. (2004):

$$Yld = \frac{Cs + a}{Cs} \cdot \left[\frac{Ca}{(a + Ca + (k \cdot W))} \cdot Myl + (1 - Myl) \right] \quad (2.10)$$

donde Yld corresponde al rendimiento esperado del cultivo (como proporción del rendimiento libre de malezas); Cs es la densidad estándar del cultivo; a es una constante que depende del cultivo; Ca es la densidad efectiva de siembra del cultivo; k es una constante que tiene en cuenta la competitividad de la maleza; W es la densidad de la maleza que sobrevive a los métodos de control; Myl es la máxima proporción de pérdida de rendimiento debido a la "alta competencia interespecífica".

La ecuación (2.10) incluye la densidad de la maleza (el número de individuos que sobreviven al finalizar el ciclo del cultivo), las densidades de siembra del cultivo y la pérdida máxima de rendimiento.

Sin embargo, esta ecuación no considera explícitamente factores importantes como (i) el efecto competitivo de los diferentes estados fenológicos, (ii) el Período Crítico de Competencia (PCC) y (iii) las pérdidas por competencia interespecífica ocurridas antes de la ejecución de las acciones de control. Por lo tanto, para representar dichos factores, se propone la introducción de una nueva variable (WC) para reemplazar a W en la ecuación (2.10). La estimación de WC es la siguiente:

$$WC = \frac{\sum_{t=t_e}^{t_m} \sum_{s=1}^{ns} \{(W_{s,t} \cdot f_s) S f_t\}}{(t_m - t_e)} \quad (2.11)$$

donde WC es la suma de los efectos competitivos de la maleza sobre el cultivo al final de la temporada, t_e es el momento de emergencia del cultivo; t_m es el momento de madurez del cultivo; f_s es el factor de competencia en s, y Sf_t es un factor que representa la susceptibilidad del cultivo a la competencia en t.

2.8 Producción de semillas

La producción de semillas de malezas ha sido modelada previamente con diferentes aproximaciones (Gonzalez-Andujar y Fernandez-Quintanilla, 1991; Pannell et al., 2004; Colbach et al., 2014). En este trabajo se propone una aproximación que considera diferentes "grupos reproductivos" (r) consistentes en conjuntos de cohortes diarias que alcanzan el estado de dispersión de semillas o semillazón. Los grupos reproductivos se generaron para dar cuenta de las diferencias en fecundidad y producción máxima de semillas a lo largo del año. Este enfoque de modelado permite considerar de forma diferenciada el efecto de las condiciones ambientales sobre la producción de semillas en cada grupo r (Figura 2.1), representado por:

$$Sp = \sum_{r=1}^{nr} \{\min(W_r \cdot Fc_r; \max_r)\} \quad (2.12)$$

donde Sp es la producción total de semillas al final de la temporada; r corresponde a un determinado "grupo reproductivo", nr es el número total de "grupos reproductivos" simulados, W_r es la densidad de individuos en r; Fc_r es la fecundidad de r; \max_r es la máxima producción de semillas de r.

2.9 Mortalidad poblacional

La ecuación (2.13) describe la mortalidad de individuos de la maleza debidas tanto a los métodos de manejo como a las condiciones de estrés térmico:

$$M_{s,t} = MC_{s,t} + M_{\text{stress}}_{s,t} \quad \forall s, \forall t \quad (2.13)$$

donde $M_{s,t}$ es la suma de individuos eliminados por acciones de control en s y t ($MC_{s,t}$) y $M_{\text{stress}_{s,t}}$ es el número de individuos que mueren por condiciones ambientales adversas en s y t . Las condiciones ambientales adversas pueden deberse a heladas, golpes de calor, estrés hídrico, caída de granizo, etc.

Para cuantificar esta situación, se generó una nueva aproximación detallada en la siguiente función:

$$\begin{cases} M_{\text{stress}_{s,t}} = W_{s,t} \cdot m_{\text{stress}_s}, & \text{Si } t \in T_a \text{ o } T_{\text{min}_t} < T_{\text{min}_{ss}} \text{ o } T_{\text{max}_t} > T_{\text{max}_{ss}} \\ M_{\text{stress}_{s,t}} = 0, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (2.14)$$

donde $M_{\text{stress}_{s,t}}$ es el número de individuos afectados por condiciones ambientales adversas en s y t ; m_{stress_s} es la tasa de mortalidad por ambientales adversas en el estado fenológico s ; T_a representa el día o rango de días en los cuales se producen condiciones ambientales adversas; T_{min_t} y T_{max_t} son las temperaturas mínima y máxima diaria en t ; y $T_{\text{min}_{ss}}$ y $T_{\text{max}_{ss}}$ son las temperaturas mínima y máxima que causan estrés térmico (Tabla 2.2).

Gracias a esta aproximación, el efecto de las condiciones ambientales adversas puede aplicarse a determinados estados fenológicos específicos que los sufren sin necesidad de afectar al resto.

2.10 Acciones de control

La simulación de acciones de control se realiza por medio de la Ecuación 2.15:

$$MC_{s,t} = W_{s,t} \cdot Ct_{s,t} \quad \forall s, \forall t \quad (2.15)$$

donde $MC_{s,t}$ es el número de individuos eliminados por acciones de control sobre el estado s , en t , $Ct_{s,t}$ es la tasa de mortalidad de malezas debida a las acciones de control

realizadas sobre s en t . $C_{s,t}$ representa la proporción de individuos efectivamente controlados.

Dentro de las opciones químicas, se consideran dos posibles escenarios: (i) la mortalidad de malezas que se produce tras el control en post-emergencia, y (ii) los efectos residuales en pre-emergencia que puedan llegar a tener los herbicidas.

- i. Para el control en **post-emergencia**, se aplican diferentes tasas de mortalidad ($C_{s,t}$) según el estado fenológico s de los individuos en un momento de intervención determinado ($t = \varphi$).
- ii. El efecto de mortalidad **preemergente** por acción de los herbicidas residuales se contabiliza a lo largo de la transición entre el inicio de la germinación y la fase de plántula ($C_{01,t}$), en función de la duración del periodo de tiempo de residualidad adoptado. Por lo tanto, la efectividad por control residual se manifiesta únicamente sobre la cohorte de individuos que ingresa al primer estado fenológico, como puede apreciarse en la Figura 2.1, ($C_{01,t}$) y en la Ecuación 2.3. Por defecto, se establece $C_{01,t} = 0$ (no genera control de individuos), y se reemplaza mediante programación por una tasa de control detallada previo a la simulación, durante el período de residualidad.

2.11 Módulo de evaluación económica

Este módulo compara los costos y los ingresos de forma sencilla facilitando la evaluación de los escenarios anuales y plurianuales de manejo. El módulo económico se compone del Margen Bruto (MB) y el Valor Actual (VA). Dichos índices se describen de forma general a continuación, y de forma detallada en el Anexo I.

El MB se calcula anualmente y compara directamente los costos y los ingresos más relevantes, sin tomar en cuenta el costo de oportunidad de la tierra o el valor de arrendamiento. Los costos incluyen: (i) semilla, fertilizante e inoculante, (ii) siembra y fertilización, (iii) intervenciones de control de malezas (materiales y operativos) y (iv) cosecha y comercialización. Los ingresos se componen del precio de venta de los granos

y el rendimiento del cultivo.

Dado que algunos estudios de simulación de MIM abarcan varios años (n), es necesario tener en cuenta el valor temporal del dinero (tasa de descuento, td). En el presente trabajo, el VA se calcula a partir del MB según la metodología descrita en (Gasparis-Wieloch, 2019). Al inspeccionar el signo y la magnitud del VA, es posible comparar diferentes estrategias respecto al resultado económico.

2.12 Módulo de impacto ambiental

Actualmente, hay una creciente preocupación por los efectos negativos de los métodos para el control de malezas. Por esta razón, en la evaluación de la sustentabilidad de la producción agropecuaria, es importante considerar no solo los aspectos económicos, sino también los efectos del uso de agroquímicos en los consumidores de alimentos, las poblaciones rurales y el agroecosistema. Además, es necesario tener en cuenta que incluso los métodos de control mecánico, como la labranza, también tienen impactos ambientales negativos que deben ser considerados dentro de un enfoque de MIM.

Por esta razón, en los últimos años comenzaron a utilizarse numerosas herramientas para la evaluación del impacto ambiental producido por los métodos de control de malezas, muchas de ellas en forma de índices. Dichos índices permiten cuantificar y comparar el riesgo asociado a la implementación de las diferentes acciones de manejo, siendo útiles para ayudar a definir estrategias de manejo sostenibles en el largo plazo.

En este trabajo, se desarrolló un módulo de impacto ambiental para cuantificar y comparar el impacto de las diferentes estrategias de manejo a través de los siguientes índices: (i) Cociente de Impacto Ambiental (Environmental Impact Quotient, EIQ) (Kovach et al., 1992), (ii) índice de pesticidas (P) (Ferraro et al., 2003; Ferraro, 2022), e (iii) índice de labranza (T) (Ferraro et al., 2003). Los índices EIQ y P se utilizan para cuantificar el impacto ambiental asociado al control químico y el

índice T para cuantificar el impacto ambiental de las herramientas de laboreo. Dichos índices se describen de forma general a continuación, y de forma detallada en el Anexo I.

Los índices P y T se definen utilizando relaciones de lógica difusa (varían entre 0 y 1). Los valores cercanos a 1 indican riesgos inaceptables, mientras que los valores cercanos a 0 sugieren una gestión respetuosa con el medio ambiente. Dicho enfoque basado en lógica difusa proporciona un marco apropiado para cuantificar tanto el impacto químico como el mecánico. Además, los índices requieren datos fácilmente disponibles, son de cálculo sencillo y proporcionan una interpretación intuitiva del impacto ambiental de los métodos de control de malezas (Ferraro et al., 2020).

El índice de pesticidas (P) indica el impacto total del uso de pesticidas en cada lote agrícola, en un año (o campaña) analizada y se calcula integrando indicadores de peligro, sobre Insectos (I), Mamíferos (M) y Peces (F). Estos indicadores se calculan en función del peligro ecotoxicológico de las materias activas presentes en los pesticidas como se detalla en (Ferraro, 2022).

El índice de labranza (T) indica el impacto total del uso de herramientas de laboreo en cada lote agrícola por año (o campaña) analizada. Se calcula integrando el impacto del laboreo (TI) y el riesgo de erosión del suelo (TR). TI depende de la herramienta de laboreo adoptada, mientras que TR está relacionado con la capacidad de uso del suelo. Este indicador se calcula según la metodología descrita en (Ferraro et al., 2003).

2.13 Resultados demostrativos del modelo propuesto

A continuación, se presentan los resultados de cuatro casos demostrativos a fin de facilitar la interpretación de las aproximaciones y relaciones entre los componentes del modelo propuesto. Los casos desarrollados no representan sistemas realistas y se incluyen básicamente para ilustrar cualitativamente el comportamiento general del simulador y mostrar el tipo de información que genera. A través de los casos se fueron modificando factores poblacionales de la maleza, de manejo y del cultivo con el objetivo de poner a prueba la aproximación de modelamiento adoptada y visualizar sus resultados.

Para facilitar la interpretación, los parámetros de cada caso se detallan a medida que adquieran relevancia para el análisis.

2.13.1 Caso I: Baja infestación de la maleza

En la Figura 2.4 se presentan los resultados correspondientes a la simulación de la dinámica poblacional de una maleza considerando un bajo nivel de semillas quiescentes en el banco ($250 \text{ semillas.m}^{-2}$).

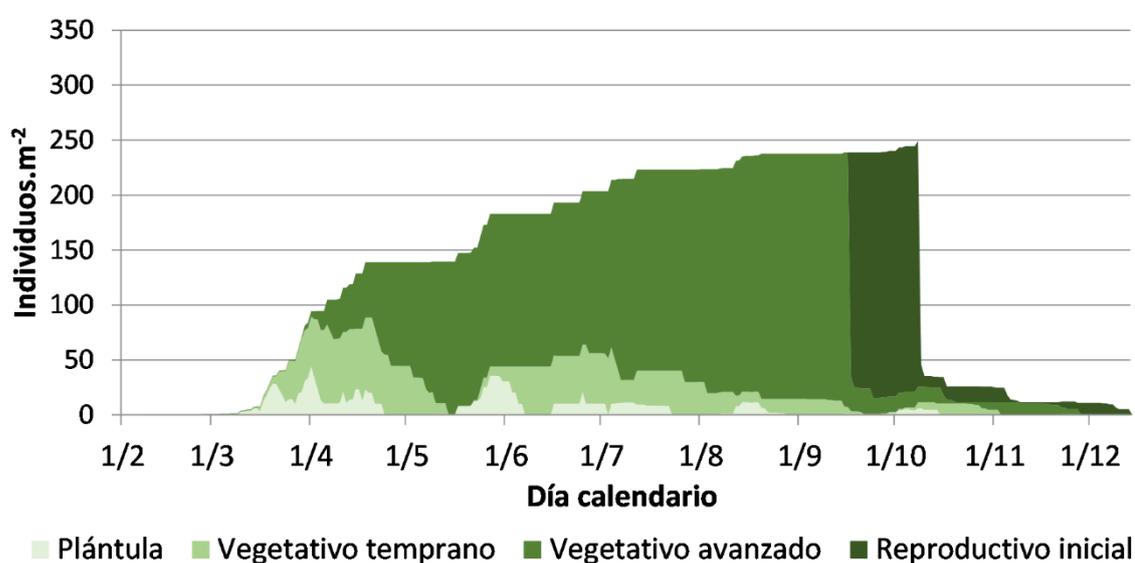


Figura 2.4. Dinámica poblacional de una maleza mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una baja infestación de semillas ($250 \text{ semillas quiescentes.m}^{-2}$).

Se muestra el número de individuos en los distintos estados fenológicos considerando un paso diario en la escala de tiempo. A partir de dicha figura se puede inferir la siguiente información:

- *Emergencia:* se observan numerosos flujos de emergencia representados por los individuos en estado de plántula presentes de forma intermitente entre marzo y octubre. Dichos flujos de emergencia podrían agruparse en 3 cohortes principales de interés agronómico: una primera cohorte desde mediados de marzo a mediados

de abril, una segunda distribuida desde mediados de mayo hasta mediados de agosto, y una tercera de menor magnitud hacia principios de octubre. Esta clasificación permite simplificar su interpretación y facilitar en algún aspecto la toma de decisiones.

- *Estados fenológicos:* los individuos permanecen menos tiempo en el estado de plántula ($s=1$) que en el estado vegetativo temprano ($s=2$), esto se observa como áreas más pequeñas y se corresponde con los valores de Th_s fijados para la simulación (70, 280, 400 y 300 °Cd para los estados $s=1$ a $s=4$ respectivamente). Adicionalmente, al fijar la fecha de floración el 15 de septiembre, todas las plantas de la tercera cohorte que finalizaron el estado vegetativo avanzado luego de dicha fecha pasaron rápidamente al estado reproductivo inicial. En el caso de las plantas de la primera y parte de la segunda cohortes de emergencia, permanecieron en el estado vegetativo avanzado hasta llegar a la fecha definida de floración, observándose el pasaje de gran cantidad de individuos al estado reproductivo luego de esta fecha.
- *Competencia intra e interespecífica:* En el caso de la competencia intraespecífica, la misma es prácticamente nula debido a que se definió una capacidad de porte del agroecosistema (K) de 250 individuos. m^{-2} coincidiendo esta densidad con el total de individuos que alcanzaron el estado de semillazón. En este ejemplo, la competencia interespecífica fue nula ya que no se simuló la presencia del cultivo.

Como resultado de este escenario de simulación, se obtuvo una producción de 12504 semillas. m^{-2} a partir de la semillazón de los individuos de las dos primeras cohortes. Se generaron dos grupos de cohortes en estado reproductivo avanzado (r), estando el primero conformado por individuos que dispersan sus semillas en condiciones propicias, y el segundo por los que lo hacen pasado ese momento. Se fijó el período previo al PCC del cultivo como momento propicio de semillazón, y al no haber cultivo en esta simulación, se definió el 25 de octubre como la fecha de referencia. El primer grupo de cohortes reproductivas ($r=1$) dispersa sus semillas a principios de octubre, y se observa en el gráfico como una caída abrupta en la cantidad de individuos en el estado reproductivo inicial. Como resultado, $r=1$ posee una fecundidad de 187,2 semillas. m^{-2} y

una producción de semillas máxima de 12000 semillas.m⁻². El segundo grupo, que dispersa sus semillas a partir del 25 de octubre, posee una fecundidad de 19,3 semillas.m⁻², y una máxima producción de 2500 semillas.m⁻².

Las estimaciones para este ejemplo se basaron en estudios previos de dinámica poblacional realizados en AVEFA (Scursoni, 2001). En este caso la primera cohorte alcanzó su máxima producción de semillas, mientras que la segunda solo produjo 504 semillas.m⁻².

La ausencia de acciones de control repercute negativamente en el sistema incrementando el nivel de infestación del lote. El balance del banco de semillas resulta positivo con un valor final de 2122 semillas quiescentes.m⁻² para el siguiente año.

2.13.2 Caso II: Infestación intermedia de la maleza

En la Figura 2.5 se presentan los resultados correspondientes a la simulación de un caso de estudio que comparte los mismos parámetros que el caso previo, excepto por un nivel intermedio de semillas quiescentes en el banco de semillas 1000 semillas.m⁻².

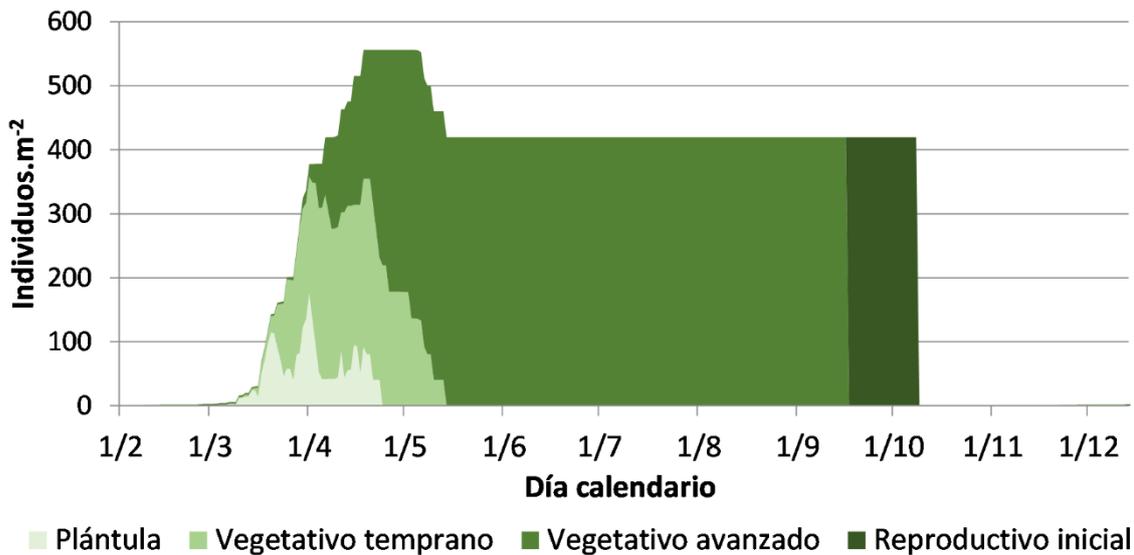


Figura 2.5. Dinámica poblacional de una maleza mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una infestación de semillas intermedia (1000 semillas quiescentes.m⁻²).

Se puede observar el efecto del auto-raleo generado por la competencia intraespecífica como una reducción significativa en la supervivencia y el establecimiento de las plántulas de maleza a partir de fines de abril (área de color verde claro). Esto contrasta con la figura del caso anterior, donde la emergencia se extiende hasta principios de octubre. Debido a la ecuación de competencia intraespecífica (Ecuación 2.7), cuando la densidad de individuos en los estados fenológicos superiores aumenta y alcanza al valor preestablecido de capacidad de porte del agroecosistema ($K = 250 \text{ individuos.m}^{-2}$), el efecto de la competencia intraespecífica se activa y afecta la incorporación de nuevas plántulas al sistema. Como se ha comentado anteriormente a los fines prácticos se han asignado distintos factores de competencia ($f_1 = 0,15$; $f_2 = 0,30$; $f_3 = 0,60$; $f_4 = 1$; $f_5 = 0$) según el estado fenológico de la maleza (Ecuación 2.8). La densidad de individuos, afectada por los factores de competencia correspondientes y en conjunto con K) determinan que si la suma ponderada de los estados fenológicos supera 250, se eliminarán los individuos que ingresan al siguiente estado fenológico.

A diferencia del caso anterior, en este ejemplo, la presencia de una única cohorte, facilita su seguimiento hasta el final de su ciclo de vida.

Como resultado de esa simulación se obtuvo una producción de semillas de 12000 semillas.m⁻². Este valor es inferior al del caso anterior por 504 semillas.m⁻², lo cual se debe a que solo produjeron semillas los individuos del primer grupo ($r=1$), y a su vez a que este alcanzó su valor máximo de producción de semillas ($\max_1 = 12000$ semillas.m⁻²). Cabe recordar que en el caso previo tanto el primer como el segundo grupo produjeron semillas.

Al comparar los dos casos podemos observar que si bien la cantidad total de individuos fue mayor en el segundo caso, estos provenían de la misma primer cohorte de emergencia, que compitió con las cohortes 2 y 3 del Caso I, eliminándolas. La ausencia de acciones de control repercutió negativamente en el sistema incrementando el nivel de infestación del lote. El balance del banco de semillas resultó positivo con un valor final de 2036 semillas quiescentes.m⁻², que producirán emergencias en el siguiente año.

2.13.3 Caso III: Acciones de control de la maleza

Para el caso III se realizaron dos simulaciones utilizando diferentes acciones de control químico. Los sub-casos presentados comparten los mismos parámetros e infestación que el caso previo. Específicamente, se representa la aplicación de una acción de control química en cada sub-caso, una con efecto no selectivo y otra con efecto no selectivo residual. Las acciones de manejo utilizadas para cada sub-caso se encuentran detalladas en la Tabla 2.6, junto con su evaluación económica y de impacto ambiental.

Tabla 2.6. Detalle de acciones de control y valores utilizados para el cálculo del índice P.

Descripción	Acciones de control	
	Sub-caso a	Sub-caso b
Abreviatura	Cntrl	Cnt Rsd
Fecha	01/05/2017	01/05/2017
Descripción	No selectivo	No selectivo residual
Herbicidas, formulación y dosis	glifosato (48%): LS, 2 L.ha ⁻¹	glifosato (48%): LS, 2 L.ha ⁻¹ + flumioxazin (48%): CS, 0,120 L.ha ⁻¹
Período de acción residual [días]	-	60
Efecto residual (Cr _{01,t})	-	1
s = 1 (Ct ₁)	0,99	0,99
s = 2 (Ct ₂)	0,99	0,99
Tasa de mortalidad para s = 3 (Ct ₃)	0,99	0,99
s = 4 (Ct ₄)	0,5	0,5
s = 5 (Ct ₅)	0	0
Herbicida + costo de aplicación [US\$.ha ⁻¹]	18	29,5
EIQ de campo [EIQ.ha ⁻¹]	14,72	14,72 + 1,38
Dosis [g de i.a. ha ⁻¹]	960	960 y 57,6
LD _{50i} ; LD _{50m} ; LD _{50f}	100; 2000;100	100 y 200; 2000 y 5000;100 y 2,3
T _{ins} ; T _{mam} ; T _{fish}	9,6; 0,48 ; 9,6	9,6 y 0,28; 0,48 y 0,01; 9,6 y 25,04
Mín(T _{ins}); Mín(T _{mam}); Mín(T _{fish})		0; 0; 0
Máx(T _{ins}); Máx(T _{mam}); Máx(T _{fish})		12084,181; 4,12887; 171814,5
Sum(T _{ins}), Sum(T _{mam}) y Sum(T _{fish})	9,600; 0,480; 9,600	9,888; 0,491; 34,643
I; M; F	0,001; 0,116; 0,000	0,001; 0,119; 0,000
P	0,059	0,061

Sub-caso III a, control químico

En el presente sub-caso se replicó el sub-caso II añadiendo únicamente la acción de control, para permitir visualizar el efecto del control sobre la dinámica poblacional de la maleza y los índices de impacto ambiental. El resultado del escenario de simulación del sub-caso III a se reporta en la Figura 2.6. y se describe a continuación.

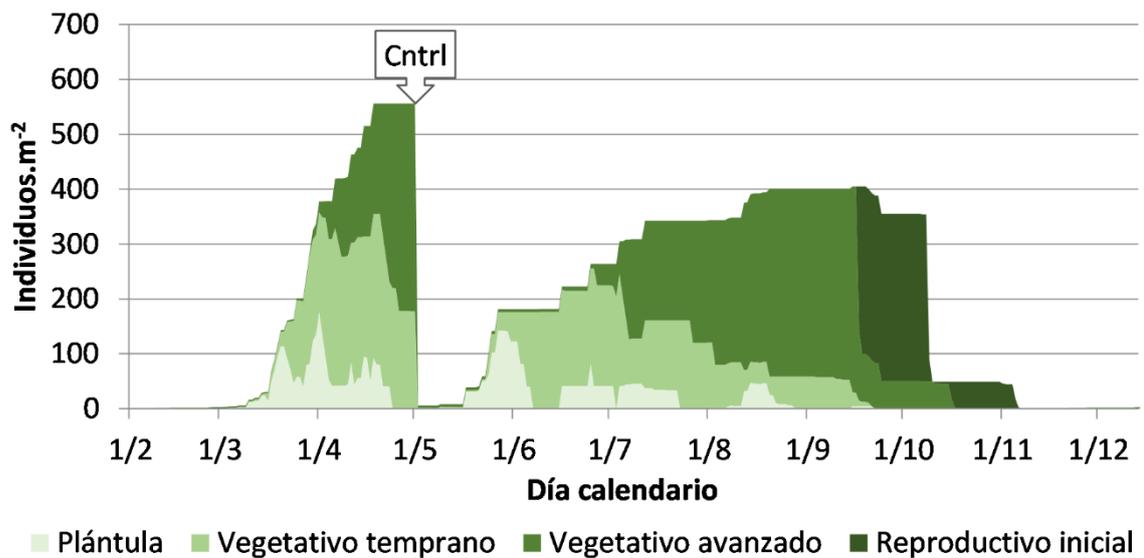


Figura 2.6. Dinámica poblacional de una maleza mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una infestación intermedia de semillas (1000 semillas quiescentes.m⁻²). La flecha indica la acción de control y fecha de aplicación. Se simula el efecto de una acción de control químico: Cntrl (glifosato (48%): LS, 2 L.ha⁻¹).

En la Figura 2.6. se puede observar una caída abrupta en la cantidad de individuos, debida a la simulación de la acción de control químico, realizada el primer día de mayo (flecha Cntrl). El control se realizó con glifosato (48%): LS, 2 L.ha⁻¹, un producto que proporciona muy buenos niveles de control: 99% de mortalidad sobre los tres estados fenológicos presentes al momento de la aplicación ($s=1$ a $s=3$), Tabla 2.6.

Al comparar las Figuras 2.5 y 2.6, podemos observar que la acción de control implementada produjo una disminución abrupta de la competencia intraespecífica, permitiendo la emergencia de nuevas cohortes. Se aprecia que en este caso sobreviven la mayoría de los individuos pertenecientes a la segunda cohorte presente inicialmente en la Figura 2.4, pero esta vez con una mayor infestación ($S_q = 1000$ semillas quiescentes.m⁻²). En este caso el efecto supresor de la competencia intraespecífica afecta solamente la última cohorte, ubicada a principios de octubre (Figuras 2.4 y 2.6).

Adicionalmente, la dinámica de los estados fenológicos y el efecto de la fecha de floración sobre la segunda cohorte se observan con aún mayor claridad en la figura 2.6.

Como resultado de esa simulación se obtuvo una producción de 12943 semillas.m⁻². Este valor es superior al del caso anterior por 943 semillas.m⁻², debido a que produjeron semillas los individuos del primer y segundo grupo de cohortes reproductivas ($r=1$ y $r=2$). En la figura, se observan disminuciones abruptas en la cantidad de individuos en el estado reproductivo inicial a principios de octubre y noviembre, ya que estas cohortes dispersaron semillas en esas fechas. El primer grupo alcanzó su valor máximo de producción de semillas ($\max_1 = 12000$ semillas.m⁻²), mientras que el segundo, produjo 943 semillas.m⁻² sin alcanzar su valor máximo posible ($\max_2 = 2500$ semillas.m⁻²). Al comparar ambos casos podemos concluir que si bien la cantidad total de individuos fue menor al segundo caso, estos provenían de diferentes flujos de emergencia que no compitieron directamente entre sí durante la producción de semillas.

La aplicación aislada de una acción de control en dichas condiciones iniciales de infestación repercutió en el sistema incrementando el nivel de infestación del lote. El balance del banco de semillas resultó positivo con un valor final de 2196 semillas quiescentes.m⁻², que emergerán en el siguiente año.

La implementación de una acción de control, generó un costo de 18 US\$.ha⁻¹, un EIQ de campo de 14,72 EIQ.ha⁻¹ y un valor de índice P de 0,059.

Sub-caso III b, control químico con efecto residual

En el presente sub-caso se replicó el sub-caso III a modificando únicamente el método de control, para permitir visualizar el efecto del control residual sobre la dinámica poblacional de la maleza y los índices de impacto ambiental. El resultado de la simulación del sub-caso III b se reporta en la Figura 2.7. y se describe a continuación.

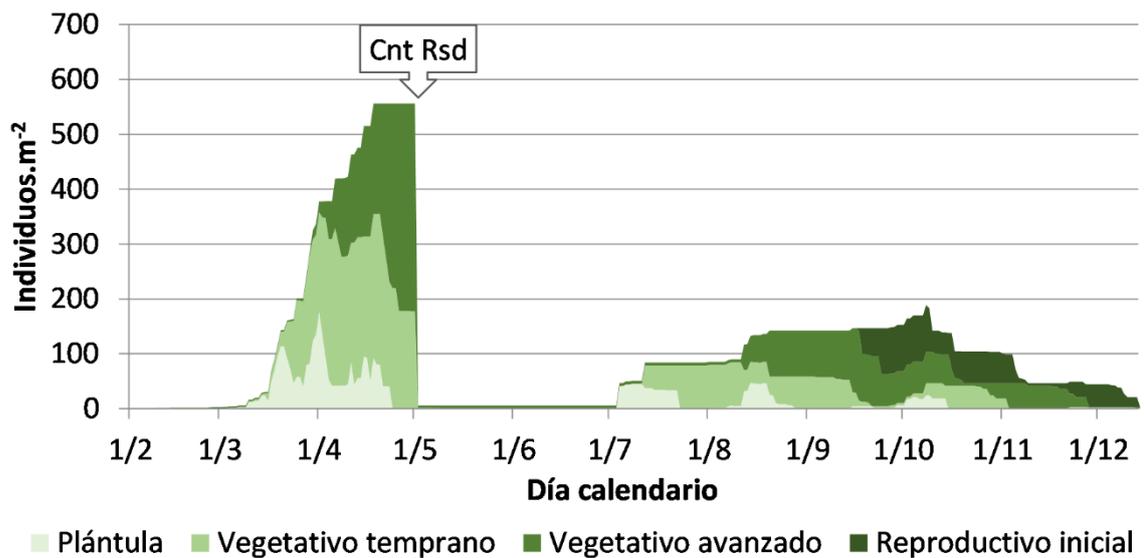


Figura 1.7. Dinámica poblacional de una maleza mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una infestación intermedia de semillas (1000 semillas quiescentes.m⁻²). Las flechas indican método de control y fecha de aplicación. Se simula el efecto de un método de control químico con efecto residual, Cnt Rsd (glifosato (48%): LS, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin (48%): CS, 0,120 L.ha⁻¹).

En la figura 2.7. podemos observar el efecto del control químico con efecto residual sobre la dinámica poblacional de la maleza como una caída abrupta en la cantidad de individuos, seguida de un período libre de maleza. La caída se debe a la simulación de una acción de control químico, realizada el primer día de mayo con una mezcla de herbicidas (glifosato (48%): LS, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin (48%): CS, 0,120 L.ha⁻¹), (Tabla 2.6). El control químico produjo muy buenos niveles de control sobre los tres estados fenológicos presentes al momento de la aplicación ($s=1$ a $s=3$), y luego proporcionó un período de residualidad que anuló la emergencia de parte de la segunda cohorte, principalmente los dos primeros flujos de emergencia ubicados entre desde mediados de mayo y durante todo junio (Figuras 2.6. y 2.7).

Con respecto a la competencia, al comparar las Figuras 2.5 y 2.7, podemos observar que la acción de control implementada produjo una disminución de la competencia intraespecífica que se venía gestando producto de la primera cohorte,

y permitió la libre emergencia de las cohortes posteriores al efecto residual. Al comparar ambos sub-casos, (Figuras 2.6 y 2.7), se infiere que a diferencia del sub-caso previo, los individuos pertenecientes a la tercera cohorte no se ven afectados por la competencia intraespecífica.

La dinámica de los estados fenológicos sobre la tercera cohorte y el efecto de la fecha de floración sobre la misma se aprecia con claridad en la figura 2.7.

Como resultado de esa simulación se obtuvo una producción de semillas de 14015 semillas.m⁻². Como puede observarse, este valor es superior al del sub-caso anterior por 1072 semillas.m⁻². Esto se debe a que produjeron semillas los individuos del primer y segundo grupo de cohortes reproductivas ($r=1$ y $r=2$). El primer grupo alcanzó su valor máximo de producción de semillas ($\max_1 = 12000$ semillas.m⁻²), y la segundo produjo 2015 semillas.m⁻² sin alcanzar su valor máximo ($\max_2 = 2500$ semillas.m⁻²). Al comparar los casos podemos observar que, si bien la cantidad total de individuos fue menor a los casos anteriores, estas provenían de grupos que no compitieron directamente entre sí durante la producción de semillas, y presentaban una mayor proporción de semillas producidas por el segundo grupo de cohortes reproductivas ($s=2$).

La aplicación aislada de una acción de control repercutió en el sistema incrementando el nivel de infestación del lote. El balance del banco de semillas resultó positivo con un valor final de 2378 semillas quiescentes.m⁻², que emergerán en el siguiente año.

La implementación de una acción de control en el presente caso generó un costo de US\$ 29.5.ha⁻¹, un EIQ de campo de 16,1 EIQ.ha⁻¹ y un valor de índice P de 0,061. Dichos valores son superiores al sub-caso anterior debido a la utilización de una mezcla de herbicidas que combina el herbicida utilizado en el caso anterior con otro herbicida que aporta un control residual sobre la maleza.

2.13.4 Caso IV: Cultivo y fechas de siembra

Para el presente caso demostrativo se realizaron dos simulaciones con la incorporación de un cultivo de trigo considerando diferentes momentos de siembra. La incorporación de un cultivo, permitió visualizar el efecto de la competencia interespecífica y calcular el margen bruto, entre otros efectos. Los sub-casos presentados comparten los mismos parámetros e infestación que el sub-caso previo.

Sub-caso IV a, siembra temprana

En el presente sub-caso se replicó el sub-caso III b añadiendo la siembra de un cultivo. El resultado de la simulación del sub-caso IV a se reporta en la Figura 2.8. y se describe a continuación.

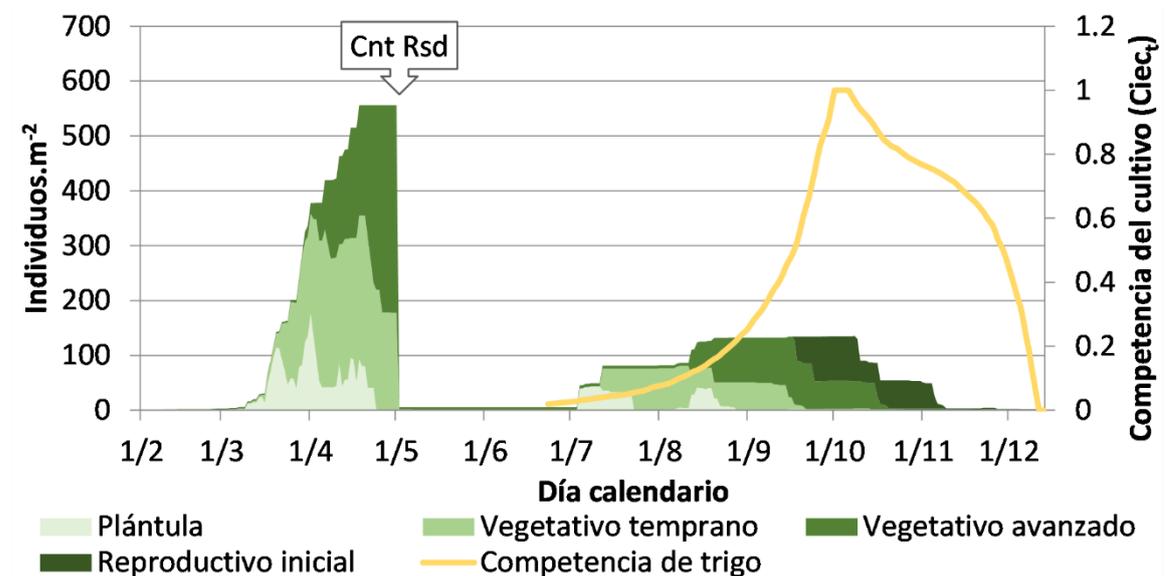


Figura 2.8. Dinámica poblacional de una maleza mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una infestación intermedia de semillas (1000 semillas quiescentes. m^{-2}). Las flechas indican método de control y fecha de aplicación. Se simula el efecto de un método de control químico con

efecto residual, Cnt Rsd (glifosato (48%): LS, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin (48%): CS, 0,120 L.ha⁻¹). El cultivo de trigo se representa a través del índice de competencia del cultivo (Ciec_t).

En la figura 2.8. se observa el efecto del control químico con efecto residual sobre la dinámica poblacional de la maleza como una caída abrupta en la cantidad de individuos, seguida de un período libre de maleza, que se extiende hasta el comienzo del crecimiento del cultivo de trigo, sembrado el 1 de junio. La dinámica diaria de competencia del cultivo de trigo puede apreciarse a través del índice de competencia del cultivo (Ciec_t) como una línea amarilla que comienza en el momento de emergencia y continúa hasta su madurez fisiológica. Los valores del mismo se encuentran representados sobre el eje vertical ubicado a la derecha del gráfico.

Al comparar las figuras 2.6 a 2.8, podemos observar que si bien la competencia intraespecífica es igual al sub-caso III b, la tercera cohorte no ingresa al sistema, al igual que se observó en el sub-caso III a. En el primer caso se debió a la competencia intraespecífica, mientras que en este se debe al efecto de competencia interespecífica del cultivo de trigo sobre la tercera cohorte.

Como resultado de esa simulación, se obtuvo un total de 13048 semillas.m⁻², lo cual representa una disminución de 967 semillas.m⁻², en comparación con el sub-caso III b. Esta reducción se debió a la competencia del cultivo, la cual impidió la incorporación de la tercera cohorte de emergencia, y por tanto no permitió el aporte de semillas de la misma.

La aplicación de una acción de control, junto con la siembra de un cultivo repercutió en el sistema disminuyendo el nivel de infestación del lote en comparación con el sub-caso III b. Sin embargo, el balance del banco de semillas resultó positivo con un valor final de 2214 semillas quiescentes.m⁻², que emergerán en el siguiente año.

En este caso demostrativo la competencia interespecífica ejercida por la maleza sobre el cultivo, cuantificada a través de la competencia ponderada maleza-cultivo (W)

arrojó un valor de 39 y en consecuencia el rendimiento esperado del cultivo fue de 75 %, 3024 kg.ha⁻¹. El margen bruto de la campaña es de 74 US\$.ha⁻¹, sin tomar en cuenta el costo de oportunidad de la tierra o el valor de arrendamiento, que podría rondar entre los 50 y 130 US\$.ha⁻¹. Por otro lado, se obtuvieron los mismos índices de impacto ambiental que el sub-caso III b, con un EIQ de campo de 16,1 EIQ.ha⁻¹ y un valor de índice P de 0,061.

Sub-caso IV b, siembra tardía

En el presente sub-caso se replicó el sub-caso IV a modificado únicamente la fecha de siembra del cultivo hacia una siembra tardía. El resultado de la simulación del sub-caso IV b se reporta en la Figura 2.9. y se describe a continuación.

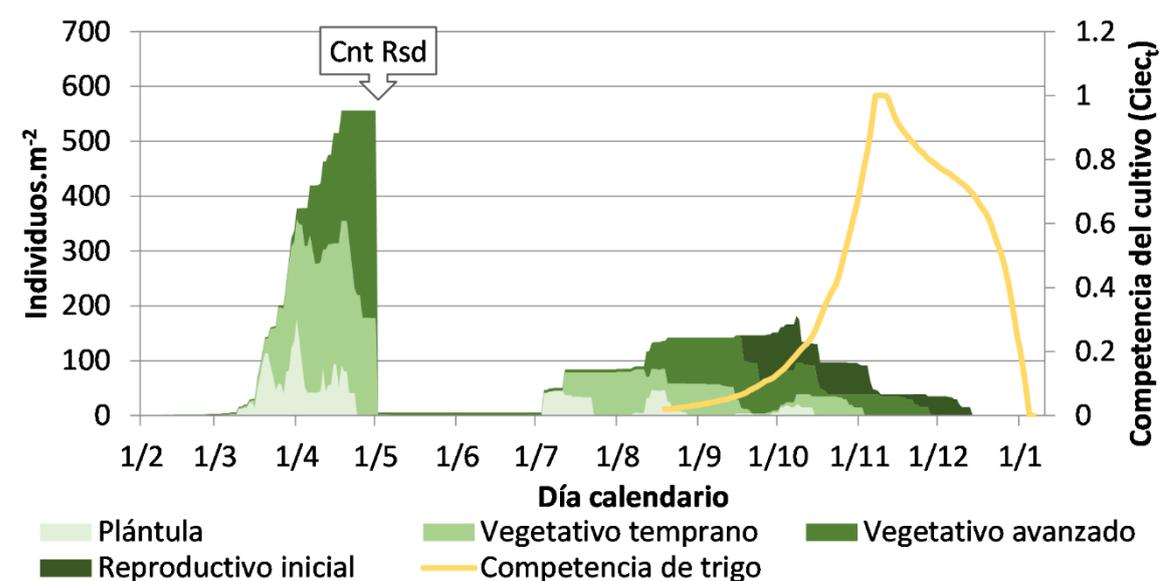


Figura 3.9. Dinámica poblacional de una maleza mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una infestación intermedia de semillas (1000 semillas quiescentes.m⁻²). Las flechas indican método de control y fecha de aplicación. Se simula el efecto de un método de control químico con

¹ <https://www.bolsadecereales.com/margenes-agricolas> (accedido marzo 2022)

efecto residual, Cnt Rsd (glifosato (48%): LS, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin (48%): CS, 0,120 L.ha⁻¹). El cultivo de trigo se representa a través del índice de competencia del cultivo (Cieci_t).

En la figura 2.9. podemos observar un gráfico similar al del sub-caso anterior, diferenciado únicamente por la fecha siembra del cultivo de trigo, que se simuló el 1 de agosto, acortando la duración de su período de crecimiento.

Al comparar las figuras 2.8 a 2.9, podemos observar que si bien la competencia intraespecífica es igual a la del sub-caso IV a, a diferencia de este, la tercera cohorte ingresa al sistema debido a una menor competencia interespecífica del cultivo de trigo en el momento de emergencia de la maleza. Esta menor competencia se debe al atraso en la fecha de siembra que lleva a un consiguiente atraso en el aumento de la competencia del cultivo.

Como resultado de esa simulación se obtuvo una producción de semillas de 13870 semillas.m⁻². Como puede observarse, este valor es superior al del sub-caso IV por 822 semillas.m⁻². Esto se debe a que el cultivo no evitó la incorporación de la tercera cohorte y por tanto permitió el aporte de semillas de la misma.

La siembra tardía del cultivo repercutió en el sistema, aumentando levemente el nivel de infestación del lote en comparación con el sub-caso IV a. Sin embargo el balance del banco de semillas resultó positivo con un valor final de 2353 semillas quiescentes.m⁻², que emergerán en el siguiente año.

En este caso demostrativo, la competencia interespecífica ejercida por la maleza sobre el cultivo, cuantificada a través de la competencia ponderada maleza-cultivo (W) arrojó un valor de 52 y el rendimiento esperado del cultivo fue de 71 % (2853 Kg.ha⁻¹). El margen bruto de la campaña, es de 56 US\$.ha⁻¹, sin tomar en cuenta el costo de oportunidad de la tierra o el valor de arrendamiento. Por otro lado se obtuvieron los mismo índices de impacto ambiental que el sub-caso III b y IV a.

2.14 Conclusiones de los casos demostrativos

Se simularon diversos casos y sub-casos de estudio para analizar el funcionamiento y los resultados del modelo. Se estudiaron diversos escenarios correspondientes a infestación inicial, tipo de control químico y fecha de siembra de un cultivo, y se analizaron variables y parámetros de interés (factor de competencia de cada estado fenológico, competencia del cultivo, producción de semillas, capacidad de porte del agroecosistema, etc.) sobre la dinámica poblacional de una maleza y los resultados agronómicos, económicos y de impacto ambiental asociados a cada estrategia.

El modelo permitió representar la dinámica poblacional con un alto grado de detalle, acompañado por gráficos de fácil interpretación. Los resultados presentados, si bien no representan estrategias de MIM, son compatibles con los esperables en la práctica agronómica dentro de una dada temporada.

CAPÍTULO 3

Sistema *Avena fatua* - trigo pan/cebada cervecera

En el presente capítulo, se describe el modelo parametrizado para las condiciones agroecológicas del sudoeste bonaerense, específicamente el sistema *Avena fatua* como maleza *driver* en una rotación de trigo pan (*Triticum aestivum*) y cebada cervecera (*Hordeum vulgare*). El modelo propuesto en el Capítulo 2 fue calibrado y validado con información experimental de campo generada durante 6 años, incluyendo manejos culturales, mecánicos y químicos, con la variabilidad climática correspondiente. Se generaron casos de estudio de MIM considerando poblaciones susceptibles y resistentes a herbicidas graminicidas. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de varias medidas de manejo cultural (ej. aumento de densidad de siembra, modificación de fecha de siembra y el uso de cultivares altamente competitivos) en combinación con una evaluación año a año de la conveniencia de aplicación o no de herbicidas post-emergentes permitiría reducir en un 60% el número de aplicaciones y aumentar entre 44 y 87 US\$.ha⁻¹ el margen bruto, con respecto a un manejo “clásico”, considerando poblaciones de *Avena fatua* susceptibles y resistentes a graminicidas, respectivamente.

3.1 Introducción

Avena fatua (L.), vulgarmente denominada avena negra o avena guacha (AVEFA) pertenece a la familia de las poáceas (gramíneas), es una especie cosmopolita de ciclo otoño-inverno-primaveral (Scursoni, 2001a). Es una maleza anual, de 50 a 150 cm de altura, posee hojas con vaina pilosa, lígula membranácea de 3 a 6 mm de largo y lámina plana de 3 a 15 mm de ancho. Una de sus características distintivas es su panoja laxa de

10 a 40 cm de longitud, erecta, compuesta por espiguillas 2-3-floras, con la raquilla articulada entre los antecios. Presenta glumas de 20 a 30 mm de longitud, con el ápice acuminado y una lemma pilosa en el dorso, de 14 a 20 mm de longitud 2-dentada en el ápice, con arista dorsal poco retorcida. Los antecios son casi negros a la madurez¹.

Avena fatua es una especie originaria de Europa y Asia, actualmente considerada una de las malezas más extendidas y dañinas de los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) en todo el mundo (Beckie et al., 2012; Anón, 2022a). AVEFA no solo causa grandes pérdidas de rendimiento sino que también genera reducciones de la calidad de cosecha en los cultivos de cereales (Martín y Scursioni, 2018).

Históricamente fue la maleza más importante en cultivos de trigo del S-SO de la provincia de Buenos Aires, tanto por el daño al cultivo como por el costo de control. Desde los años 70, la evolución en la eficiencia de uso de los herbicidas para su control minimizó este inconveniente. Sin embargo, su presencia en los lotes continúa siendo alta (Vigna et al., 2013). Relevamientos realizados hace más de 30 años, identificaron la presencia de AVEFA en aproximadamente el 40% de los cultivos de trigo. Actualmente, AVEFA se encuentra presente en el 60% de los campos de cereales del sudoeste bonaerense causando pérdidas de rendimiento del 20-30% en los cultivos de trigo y cebada (Scursioni y Satorre, 2005; Gigón et al., 2008; Scursioni et al., 2014, 2021). Cabe mencionar que en nuestro país se cultivan actualmente 6,75 y 1,63 M ha de trigo y cebada, respectivamente. El 10% de la superficie cultivada con trigo y el 29% de la superficie cultivada con cebada se encuentran en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Anón, 2022b).

AVEFA es considerada una maleza driver, tanto por las pérdidas ocasionadas sobre el rendimiento del cultivo, como por los gastos que ocasiona para lograr un control adecuado (Vigna et al., 2013). AVEFA presenta patrones irregulares de emergencia a campo debido a la gran variabilidad interanual de las precipitaciones, las fluctuaciones estacionales de temperatura y una adaptación específica de la especie al ambiente agroecológico (Chantre et al., 2012). Las semillas de AVEFA son también contaminantes

¹ <https://www.sinavimo.gob.ar/plaga/avena-fatua>

del grano causando a su vez importantes reducciones en el precio de venta (Martín y Scursoni, 2018).

El manejo de la especie en cereales de invierno es principalmente químico (Scursoni et al., 2019). Los herbicidas selectivos post-emergentes utilizados en los cultivos de trigo y cebada son predominantemente inhibidores de la ACCasa (ej., diclofop-metil, fenoxaprop-P-etil, clodinafop-propargil, pinoxaden, tralkoxidim) e inhibidores de la ALS (ej., iodosulfuron-metil-sodio + mezosulfuron-metil, piroxsulam y flucarbazone-sodio). AVEFA es una de las especies maleza con una resistencia a herbicidas inhibidores de la ACCasa (Heap, 2014, 2020). En 2010 se confirmaron biotipos de AVEFA resistentes a los inhibidores de la ACCasa (A/1) (ej., clodinafoppropargil, diclofop-metil y fenoxaprop-P-etil) (Heap, 2020) y la resistencia a pinoxaden también se observó en experimentos de campo (Vigna et al., 2013).

Por las consideraciones anteriores, el planeamiento del MIM resulta necesario para un manejo sustentable de la maleza. Algunos autores, tales como Matsushashi et al., (2021) han examinado varias estrategias como la rotación de cultivos, el cambio de épocas de siembra, el uso de cultivos o variedades competitivas, el aumento de la densidad de siembra y el aumento del contenido de agua del suelo para reducir el banco de semillas de AVEFA. Sin embargo, el número de tratamientos que pueden examinarse simultánea o repetidamente mediante experimentos a campo es limitado. Además, determinar los efectos de numerosas opciones y repeticiones es difícil y requiere comparaciones simultáneas a lo largo de múltiples años (Matsushashi et al., 2021).

Debido a lo mencionado anteriormente, se considera que AVEFA es una especie de gran importancia para el sudoeste bonaerense y que el empleo de herramientas de asistencia a la toma de decisiones basada en modelos de simulación podría beneficiar el planeamiento del manejo integrado. Este capítulo tiene como objetivos: (i) evaluar la capacidad de adaptación del modelo propuesto a un sistema cultivo/maleza de ciclo otoño-invierno-primaveral típico de la región sudoeste bonaerense, *A. fatua* como maleza driver en rotación – trigo pan/cebada cervecera; (ii) generar escenarios multianuales para

comparar el efecto de diferentes estrategias de manejo, (ii) validar el modelo con datos independientes.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Descripción general del modelo

En esta sección se describe la adaptación del modelo propuesto a un sistema de rotación típico del sudoeste bonaerense, trigo pan (*Triticum aestivum* L.) /cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) en competencia con *A. fatua* como maleza driver. Las principales características distintivas y las modificaciones introducidas al modelo de base descrito en el Capítulo 2 se detallan a continuación en las secciones subsiguientes.

3.2.2 Diagrama anual, variables y parámetros

En la Figura 3.1 se presenta un diagrama representativo del modelo de competencia maleza-cultivo, específico para un ciclo anual otoño-inverno-primaveral. Los parámetros demográficos de AVEFA y de los cereales cultivados se detallan en las Tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

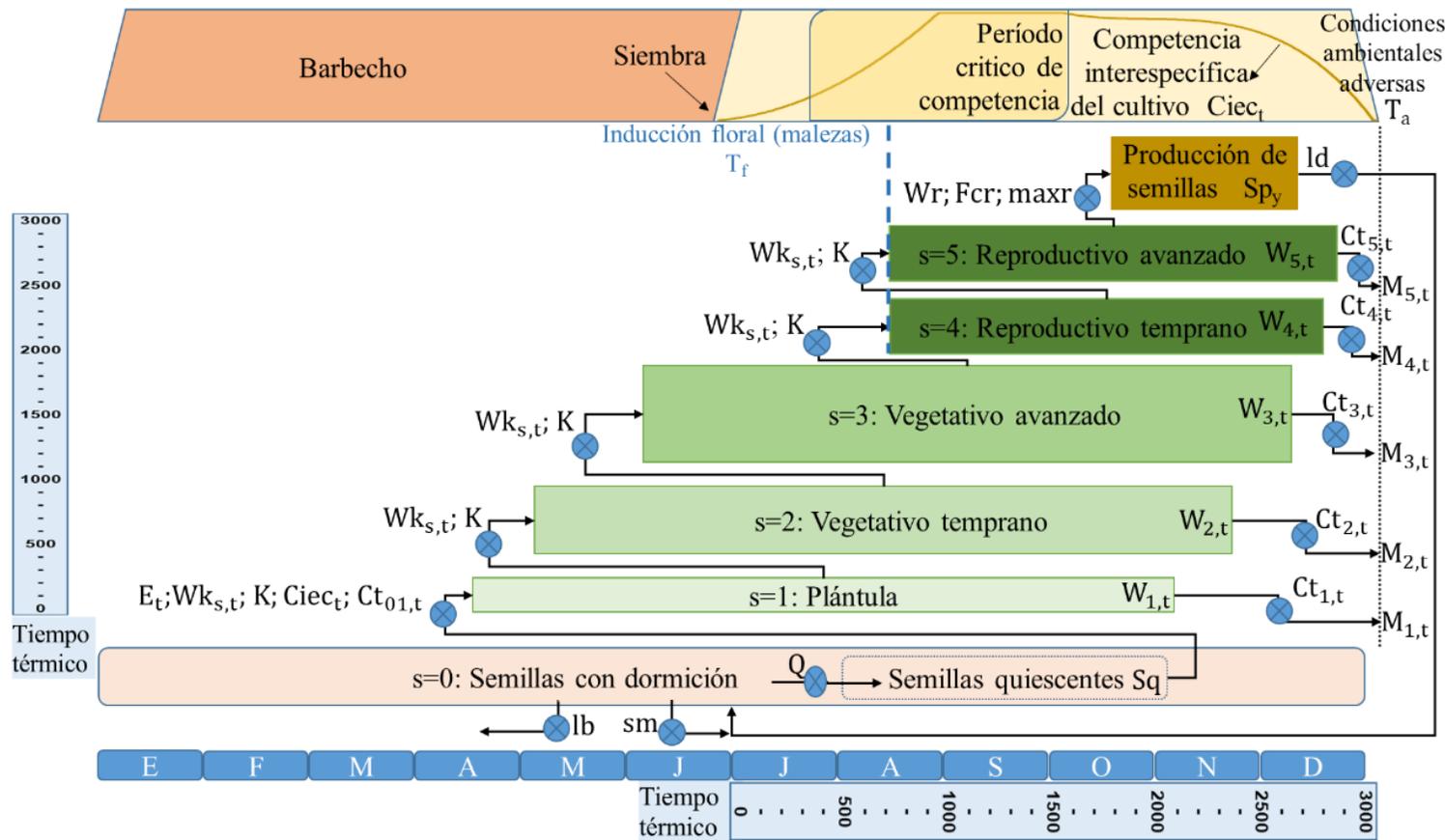


Figura 3.1. Diagrama general ilustrando los principales componentes del modelo de simulación, considerando la maleza AVEFA en competencia con el cultivo de cereales, a lo largo de una campaña agrícola (ver Tablas 3.1 y 3.2 para descripción de los parámetros). Sobre la izquierda se observa una escala de tiempo- térmico utilizada para guiar el desarrollo de la maleza. En la base se observan escalas de tiempo-térmico y cronológico utilizadas para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Sobre la parte superior se observa una clara

distinción entre los momentos de barbecho y cultivo. En el ciclo de cultivo se detallan momento de siembra, período crítico de competencia (PCC) e índice de competencia interespecífica del cultivo ($Ciec_t$). El ciclo de vida de la maleza se representa de una manera simple definiendo los estados más representativos ($W_{s,t}$), siendo $s=0$: Banco de semillas; $s=1$: Plántula (1 hoja verdadera); $s=2$: Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas); $s=3$: Vegetativo avanzado (macollaje); $s=4$: Reproductivo temprano (floración); $s=5$: Reproductivo avanzado (senescencia).

Tabla 3.1. Parámetros de AVEFA. CE= conocimiento experto. (* Adaptado de).

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad	Fuente
ns	Número de estados fenológicos	5	-	CE
T _b	Temperatura base cardinal para la acumulación de tiempo-térmico	0	°C	(Martín y Scursoni, 2018)
Th ₁	s=1 a s=2. Plántula a 2-4 Hojas	70		(Martín y Scursoni, 2018)
Th ₂	Tiempo-térmico requerido por una cohorte diaria para pasar de s=2 a s=3. 2-4 Hojas a Macollaje	280	°Cd	CE
Th ₃	s=3 a s=4. Macollaje a Reproductivo inicial	400		
Th ₄	s=3 a s=4. Reproductivo inicial a Reproductivo	300		CE
t _f	Día de inducción floral	258	Día juliano	CE
L	Longevidad del banco de semillas	3	años	
Q ₁	Proporción de semillas que se encuentran quiescentes en el año cero y fueron producidas en el año	y=-1	0,7	(Scursoni, 2001b)
Q ₂		y=-2	0,2	
Q ₃		y=-3	0,1	
sm	Tasa de mortalidad anual del banco de semillas	0,0732	-	
ld	Tasa de pérdida de semillas al momento de la dispersión natural	0,67	-	
lb	Tasa de pérdida de semillas por factores bióticos durante el primer barbecho (predación, mortalidad)	0,2075	-	

Continuación Tabla 3.1. Parámetros de AVEFA. CE= conocimiento experto. (* Adaptado de).

Parámetro	Descripción		Valor	Unidad	Fuente
K	Capacidad de porte del agroecosistema		250	i.m ⁻²	CE
iam	Tasa de mortalidad por competencia intraespecífica		1	-	CE
f ₁		s=1	0,15		
f ₂		s=2	0,3		
f ₃	Factor de competencia para	s=3	0,6	-	CE
f ₄		s=4	1		
f ₅		s=5	0		
Ta	Día o rango de días en donde se producen condiciones ambientales adversas		1	Día juliano	CE
Tminss	Temperatura mínima que causa estrés térmico		-	°C	CE
Tmaxss	Temperatura máxima que causa estrés térmico		-	°C	CE
mstress ₁		s=1	1		
mstress ₂		s=2	1		
mstress ₃	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en	s=3	1	-	CE
mstress ₄		s=4	1		
mstress ₅		s=5	0		
nr	Número de grupos de cohortes reproductivas		2	-	CE
FC ₁	Fecundidad individual del grupo de cohorte reproductiva 1		187,2	semillas.m ⁻²	
FC ₂	Fecundidad individual del grupo de cohorte reproductiva 2		19,3	semillas.m ⁻²	
max ₁	Máxima producción de semillas de la cohorte reproductiva 1		12000	semillas.m ⁻²	(Scursoni, 2001b) (*)
max ₂	Máxima producción de semillas de la cohorte reproductiva 2		2500	semillas.m ⁻²	

Tabla 3.2. Parámetros de los cultivos de cereales para el caso de estudio (momento de siembra, standard y siembra tardía). CE= conocimiento experto. * = adaptado de.

Parámetro	Descripción	Valor			Unidad	Fuente
		Cebada	Trigo			
			Baja competencia	Alta competencia		
G1	Tiempo-térmico acumulado al momento de cambiar de función	870	1116		°Cd	DSSAT*
G2	Tiempo-térmico acumulado requerido para alcanzar la madurez fisiológica del cultivo	1480	2260		°Cd	DSSAT*
PCC	Período crítico de competencia del cultivo	Variable			-	Cronos@ ²
Sf _t	entre el día 0 y el día t, previo al PCC	$Sf_t = \min \left[\left(\frac{LAI_t}{LAI_{hc}} \right) \left(\frac{C_s}{C_a} \right); 1 \right]$		∀t	-	CE
Sf _t	Susceptibilidad del cultivo durante los días t del PCC	5	5		-	CE
Sf _t	posterior al PCC	1	1		-	CE
LAI _{hc}	Valor de TPLA que representa una situación de alta competencia	0,5	6	1	-	CE
α	Parámetro de LAI _t	0,02	0,1138		-	DSSAT*
ω	Parámetro de LAI _t	0,0054	3,71x10 ⁻³		-	DSSAT*
β	Parámetro de LAI _t	3,6	47,98		-	DSSAT*
γ	Parámetro de LAI _t	7,5x10 ⁻⁴	0,08012		-	DSSAT*
δ	Parámetro de LAI _t	-1,15x10 ⁻⁶	5,02x10 ⁻⁵		-	DSSAT*
ε	Parámetro de LAI _t	0	1,07x10 ⁻⁸		-	DSSAT*
Myl	Máxima proporción de pérdida de rendimiento	45	60	20	-	(López y Vigna)
a	Constante derivada del cultivo	1	10		-	Cal. y Valid.
k	Constante de competencia del cultivo	2	3,7		-	Cal. y Valid.
GY	Rendimiento esperado	5000	4000	3600	Kg.ha ⁻¹	CE

² <http://cronos.agro.uba.ar/> (Página web, accedido marzo 2023)

3.2.3 Información agrometeorológica

Como base para la simulación, se utilizó información agrometeorológica diaria obtenida de la estación meteorológica INTA Bordenave, disponible en el Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica, de acceso libre³.

3.2.4 Emergencia de la maleza

Los patrones de emergencia de AVEFA fueron simulados utilizando el modelo de red neuronal desarrollado anteriormente por el grupo de trabajo, el cual fue específicamente ajustado y validado para la región estudiada (Chantre et al., 2018). El modelo utiliza como variables de entrada directamente los datos meteorológicos (temperaturas mínimas y máximas diarias; precipitación diaria) y el día juliano, correspondientes al período comprendido entre 1 de febrero y 31 de diciembre. La emergencia relativa diaria (E_t), expresada como proporción del total de semillas quiescentes (S_q), es la variable de salida de la red. La estructura de la red es simple, compuesta por una única capa interna de 65 neuronas. Los parámetros del modelo (pesos y bias) fueron ajustados con un algoritmo de regularización bayesiano.

3.2.5 Dinámica poblacional

La dinámica poblacional de la maleza se simula a través de cohortes diarias. Los individuos de cada cohorte pasan a través de cinco estados fenológicos dentro del ciclo de vida, siendo $s=1$: Plántula (1 hoja verdadera); $s=2$: Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas); $s=3$: Vegetativo avanzado (macollaje); $s=4$: Reproductivo temprano (floración); $s=5$: Reproductivo avanzado (senescencia). Como se detalla en el Capítulo 2, para pasar de un estado fenológico al siguiente cada cohorte debe acumular una

³ <http://siga.inta.gob.ar/#/> (Página web, accedido marzo 2023)

determinada cantidad de tiempo-térmico (Th_s). Además, al momento de pasar de un estado fenológico al siguiente, cada cohorte se verá afectada por tasas de mortalidad y competencia ($Ct_{s,t}$, $Cr_{01,t}$, $mstress_{1,i a_{s,t}}$). Valores de referencia de estos parámetros se reportan en la Tabla 3.1.

3.2.6 Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza

El índice de competencia interespecífica del cultivo ($Ciec_t$) se calcula como una tasa de supervivencia sobre el estado cotiledonar de la maleza (Figura 3.1). La magnitud de $Ciec_t$ depende tanto de la densidad de siembra del cultivo como del LAI_t y LAI_{hc} como se detalla en el Capítulo 2.

Para la simulación del LAI_t de los cultivos de trigo y cebada, se utilizaron ecuaciones ajustadas a partir de simulaciones en DSSAT. El modelo DSSAT se adaptó al agrosistema con: (i) información agrometeorológica (Sección 3.2.3); (ii) información genética y de manejo (Travasso y Magrin, 1998; Sadras y Monzon, 2006; Cantamutto et al., 2016); y (iii) un perfil de suelo representativo para la zona de estudio (De San Celedonio et al., 2014).

A partir de los resultados de 10 años (2005-2015) de simulaciones en DSSAT, se estimó el estado fenológico y se ajustó una función de LAI_t , según la acumulación de tiempo térmico del cultivo (D_t). Los estados del cultivo se establecieron como: (i) emergencia, (ii) el período crítico de competencia (PCC), y (iii) madurez fisiológica y cosecha. La función de LAI_t se ajustó mediante parámetros de funciones polinómicas en Excel SOLVER®. El LAI_t de los cultivos se simula mediante la siguiente ecuación simplificada:

$$LAI_t = \begin{cases} \alpha^{(\omega \cdot D_t)}, & \text{Si } (D_t < G1) \\ \beta - \gamma \cdot D_t + \delta \cdot D_t^2 - \varepsilon \cdot D_t^3, & \text{Si } (D_t \geq G1) \\ 0, & \text{Si } (D_t \geq G2) \end{cases} \quad \forall t \quad (3.1)$$

donde α , ω , β , γ , δ , ϵ son los parámetros de ajuste; D_t es la acumulación del tiempo térmico del cultivo ($^{\circ}\text{Cd}$) en el día t ; $G1$ es el tiempo térmico acumulado en el día de mayor LAI_t ; y $G2$ es el tiempo térmico acumulado necesario para alcanzar la madurez fisiológica del cultivo. Los parámetros de la Ecuación 3.1 se detallan en la Tabla 3.3.

El parámetro LAI_{hc} , es utilizado como un valor límite máximo en la competencia cultivo-maleza. El valor de LAI_{hc} se ajustó manualmente como se explicó en la sección 2.6, en función de la capacidad competitiva del cultivar. Los valores ajustados se reportan en la Tabla 3.2.

Finalmente, a partir LAI_t en función de D_t y de los parámetros LAI_{hc} y C_a se obtiene la magnitud de Ciec_t que afecta a la maleza en el estado cotiledonar ($s=1$).

3.2.7 Producción de semillas

Al finalizar el ciclo de vida de la maleza se calcula la producción de semillas en función de: (i) la densidad de individuos que alcanzan el estado reproductivo avanzado, y (ii) el momento en el cual alcanzan dicho estado, conformando así grupos de cohortes reproductivas (r). El momento permite considerar de forma diferenciada el efecto de las condiciones ambientales sobre la producción de semillas en cada grupo r . En este agrosistema se utilizó el comienzo del PCC del cultivo como el momento de división: los individuos que alcanzan el estado reproductivo avanzado previo al PCC forman parte del grupo 1 ($r=1$), individuos que lo hacen posteriormente pasan a formar parte de $r=2$.

Los grupos reproductivos dan cuenta de las diferencias en fecundidad y producción máxima de semillas a lo largo del año. Para el cálculo se utiliza la Ecuación 2.12 del Capítulo 2. En la Figura 3.2 se observa la producción de semillas en función de la densidad de individuos para cada grupo de cohortes reproductivas.

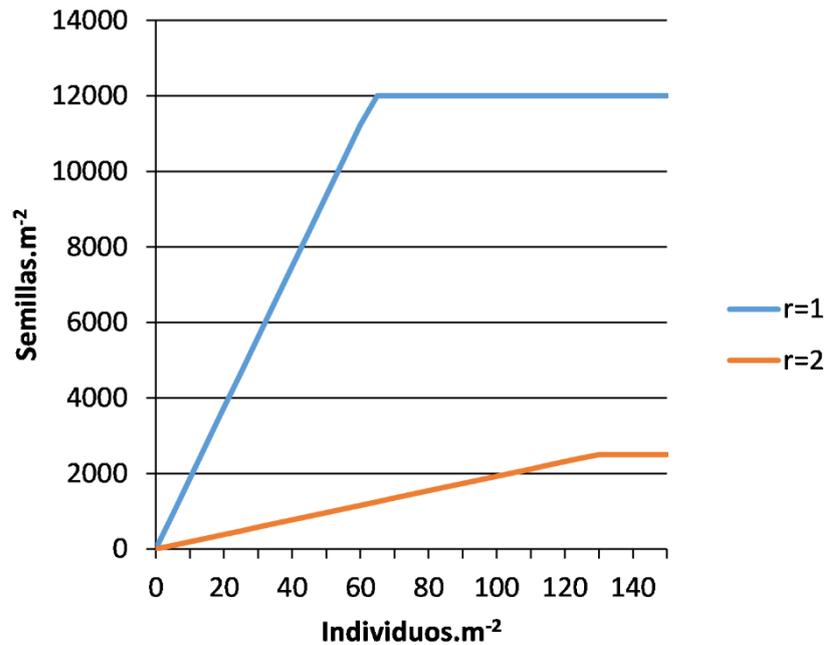


Figura 3.2. Producción de semillas (semillas.m⁻²) en función de la densidad de individuos de *Avena fatua* (Individuos.m⁻²) en cada grupo de cohortes reproductivas (r) (Ecuación 2.12).

3.2.8 Parámetros económicos, ambientales y de control

Los parámetros económicos utilizados en las simulaciones (Tabla 3.3), se obtuvieron de una fuente actualizada, específica para la región bajo estudio (Anón, 2020). Las acciones de control correspondientes al sistema AVEFA-trigo/cebada se presentan en la Tabla 3.4. Los valores de EIQ se obtuvieron de Eshenaur et al. (2019) y la dosis de campo de EIQ se calculó según Kovach et al. (1992) (Tabla 3.4). Los parámetros para el cálculo de los índices P y T (T_{mam}, T_{ins}, T_f y T_{imp}) se calcularon a partir de los valores de toxicidad obtenidos de Pesticide Properties DataBase (2022). Las rotaciones de cereales en el sudoeste bonaerense se realizan principalmente bajo siembra directa, por lo que en el sistema actual no se consideró la opción de control mecánico.

Tabla 3.3. Parámetros económicos utilizados para el sistema AVEFA-trigo/cebada. CE = conocimiento experto.

Descripción del parámetro	Cebada		Trigo		Fuente
	Densidad standard	Densidad alta	Densidad standard	Densidad alta	
Costo de siembra (semilla + siembra + fertilizante + inoculante)	283 US\$.ha ⁻¹	286 US\$.ha ⁻¹	288 US\$.ha ⁻¹	318 US\$.ha ⁻¹	
Precio de venta de granos (Prc)	150 US\$ tn ⁻¹		185 US\$ tn ⁻¹		(Anón, 2020)
Gasto de cosecha y comercialización (%GCC)	25 % del ingreso bruto		30 % del ingreso bruto		
Tasa de descuento (td)	15 %				

Tabla 3.4. Detalle de acciones de control consideradas para el sistema AVEFA-trigo/cebada.

Acción de control	Herbicidas				Referencias
	Total (G2)	Total + residual (G+F)	Selectivo (Pin)	Selectivo (Dic)	
Momento de aplicación	Barbecho	Barbecho	Post-emergente	Post-emergente	
Formulación y dosis	glifosato (LS 48%): 2 L.ha ⁻¹	glifosato (LS 48%) + flumioxazin (CS 48%): 2 L.ha ⁻¹ + 0,120 L.ha ⁻¹	pinoxaden (EC 6%): 0,8 L.ha ⁻¹	diclofop-metil (CE 28,4%): 2 L.ha ⁻¹	(Scursoni et al., 2011, 2021; Gigón et al., 2013; Vigna et al., 2013)
Período de acción residual [días]	-	60	-	-	
Efecto residual (Cr _{01,t})	-	1	-	-	
s = 1 (Ct ₁)	1	1	1 (0,66)	1 (0,67)	
Tasa de mortalidad para s = 2 (Ct ₂)	1	1	0,9 (0,66)	0,9 (0,67)	
s = 3 (Ct ₃)	1	1	0,7 (0,3)	0,7 (0,3)	
s = 4 (Ct ₄)	0,5	0,5	0,2 (0,165)	0,2 (0,165)	
s = 5 (Ct ₅)	0	0	0 (0)	0 (0)	
Herbicida + costo de aplicación [US\$.ha ⁻¹]	18,00	29,52	43,60	62,07	(Anón, 2020)
EIQ de campo [EIQ.ha ⁻¹]	14,72	14,72 + 1,38	0,73	14,77	(Eshenaur et al., 2023)
Índice T Timp	-	-	-	-	(Ferraro et al., 2003)
Tmam	0,48	0,48 y 0,01	0,01	1,11	
Índice P Tins	9,60	9,60 y 0,29	0,48	5,68	(University of Hertfordshire, 2022)
Tf	9,60	9,60 y 25,04	4,66	1832,25	

3.3 Calibración y validación

3.3.1 Estimación del rendimiento esperado

Para la estimación del rendimiento esperado (Yld) se ajustaron los parámetros a y k (Ecuación 2.10) al presente caso de estudio. Los parámetros fueron calculados minimizando la diferencia (mínimos cuadrados) entre las predicciones y los datos experimentales extraídos de ensayos realizados a campo en la EEA-INTA Bordenave, Buenos Aires, Argentina ($37^{\circ}46'08.0''S$ $63^{\circ}05'30.5''O$). Para el sistema AVEFA-trigo, los datos fueron recolectados durante cuatro años: 1989, 1992, 1993 y 1994 (López y Vigna, 2004) ($N = 41$). Para el sistema AVEFA-cebada, los datos se obtuvieron durante dos años: 1990 y 2003 (López y Vigna, 2004) ($N = 28$).

Los experimentos a campo fueron realizados utilizando distintos tipos de manejo cultural (variedades, fechas de siembra y densidades de siembra), ensayos de control químico, control mecánico, competencia con AVEFA e información sobre el estado fenológico en el momento de control.

3.3.2 Metodología calibración y validación

Del conjunto de datos de rendimiento disponibles, el 70% se seleccionaron al azar para la calibración. El 30% restante se utilizó para la validación del modelo. Para la calibración, se obtuvieron los valores de a y k (Ecuación 2.10) que minimizan la raíz cuadrada media del error (RMSE, siglas en inglés) entre los Yld observados y los simulados utilizando el optimizador numérico Solver de Excel. Los resultados obtenidos son $a = 10,0$ y $k = 3,7$ para trigo y $a = 1,0$ $k = 2,0$ para cebada (Figuras 3.3a y 3.4a para trigo y cebada, respectivamente). Los modelos fueron validados obteniéndose un RMSE = 0,08 y 0,04 para trigo y cebada, respectivamente (Figuras 3.3b y 3.4b).

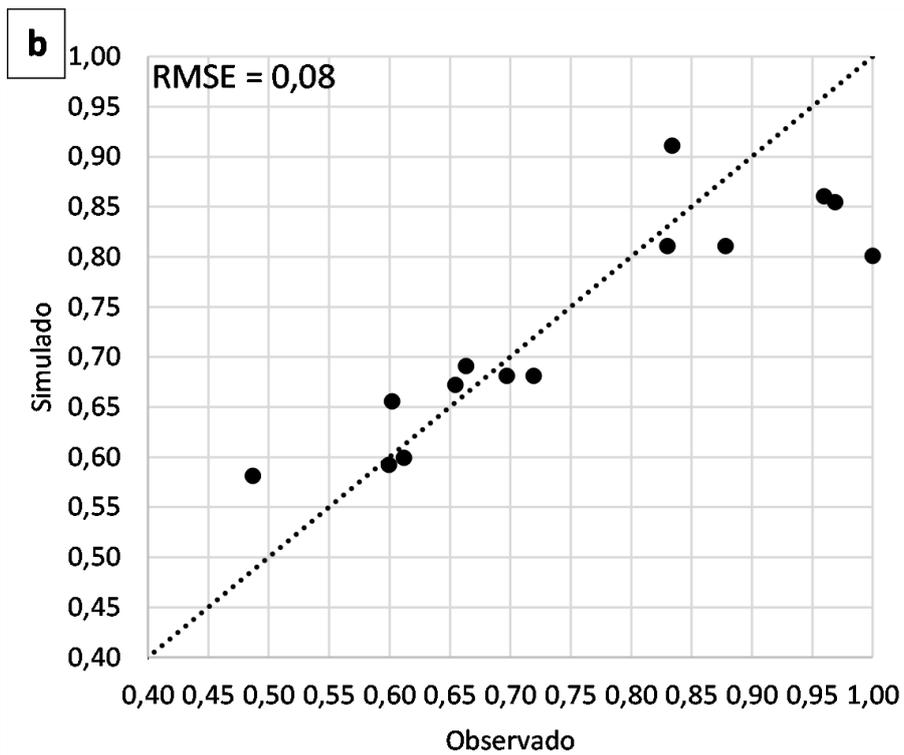
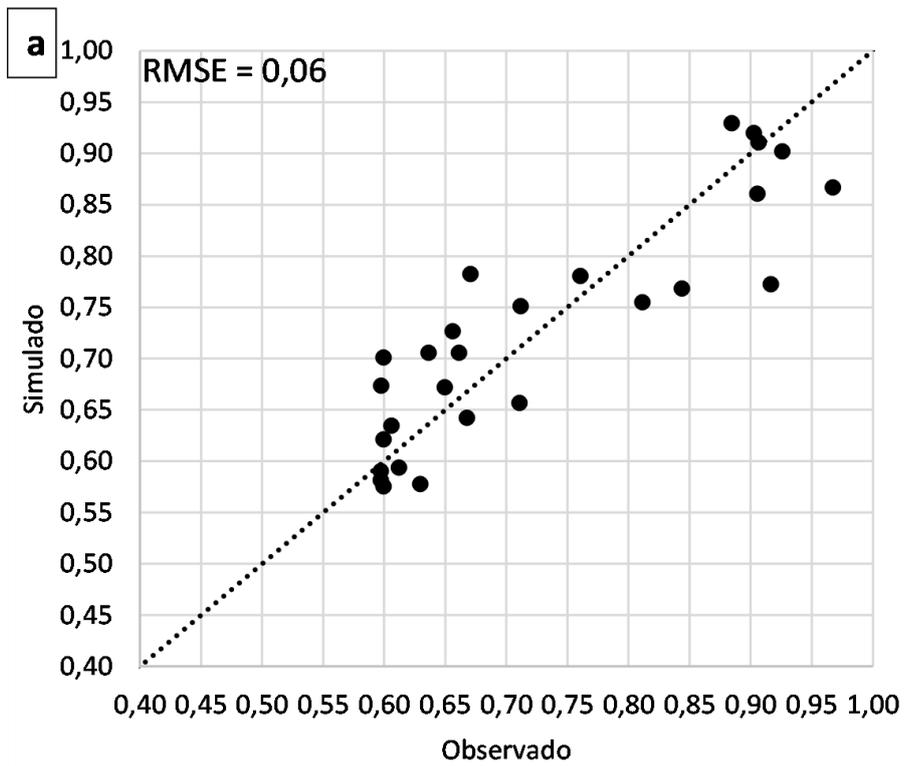


Figura 3.3. Calibración (a) y validación (b) de la función de rendimiento esperado (Yld) para trigo.

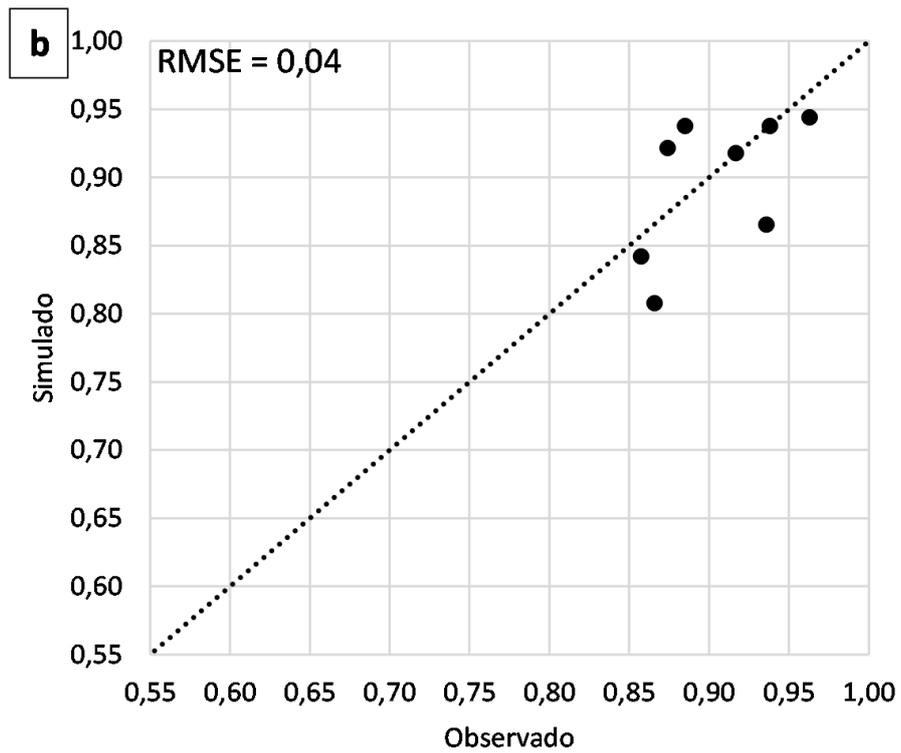
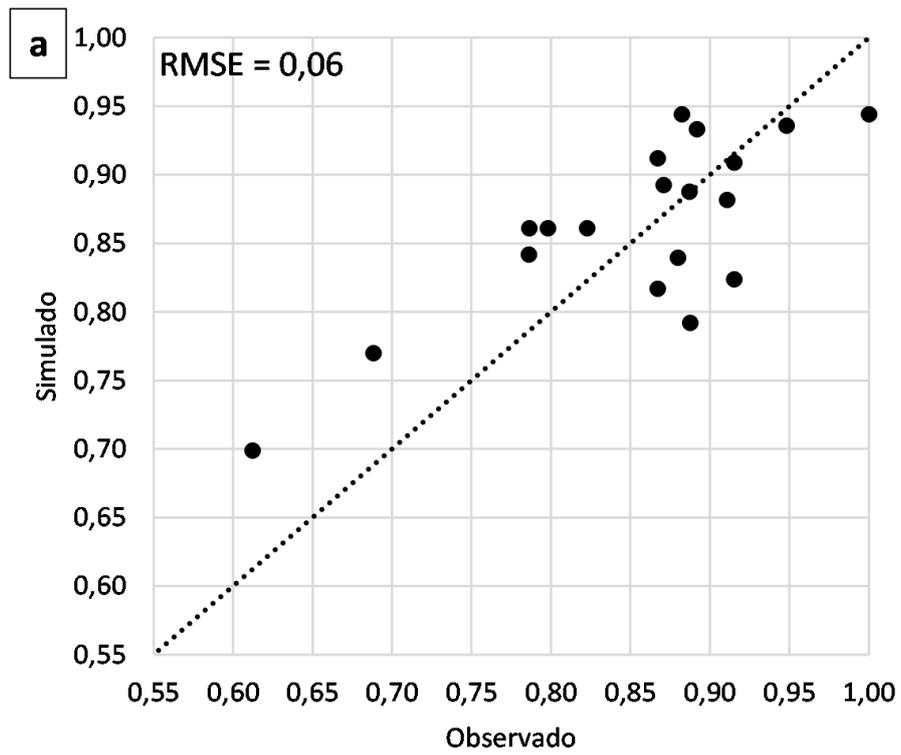


Figura 3.4. Calibración (a) y validación (b) de la función de rendimiento esperado (Yld) para cebada cervecera.

3.4 Resultados y análisis

3.4.1 Competencia interespecífica

Se presentan las curvas del Índice de Competencia de trigo y cebada (Cie_c_t) en función de tiempo térmico acumulado (D_t) para varios LAI_t , capacidad competitiva del cultivar (LAI_{hc}) y densidad de siembra (Ca) (Figura 3.5).

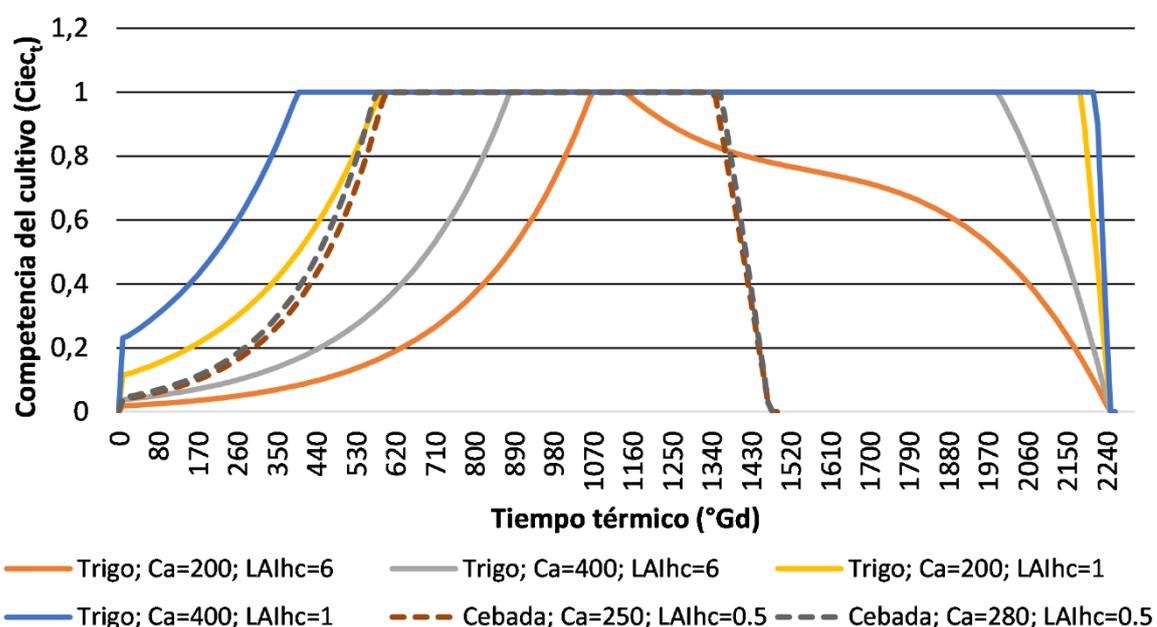


Figura 3.5. Índice de competencia interespecífica de los cultivos de trigo y cebada (Cie_c_t) en función de la acumulación de tiempo térmico (D_t). Ca =densidad de siembra; LAI_{hc} = valor de LAI que representa una situación de alta competencia, según la capacidad competitiva del cultivar. Los valores se detallan en la Tabla 4.2.

En todos los casos se observa el aumento gradual de la competencia en la primera etapa del cultivo hasta llegar a un valor máximo y posteriormente una meseta y la reducción hacia final del ciclo. Se puede apreciar la diferencia en longitud de ciclo para trigo y cebada. En todas las curvas se alcanza el valor máximo de competencia del cultivo con diferencias en la amplitudes y pendientes según la densidad de siembra y la capacidad competitiva de cada cultivar de trigo.

3.4.2 Descripción general de los casos de estudio

En las siguientes subsecciones se simula la alternancia anual de trigo pan / cebada cervecera en competencia con AVEFA. Se utilizó un horizonte de planificación de cinco años (horizonte táctico-estratégico) para demostrar las principales características y resultados del modelo de simulación propuesto. Se consideró como punto de partida un alto nivel de infestación en el lote (banco de semillas quiescentes = 4500 semillas.m⁻²). Se simularon cinco casos de estudio (Tabla 3.5), cada uno de los cuales combina diferentes estrategias de manejo, incluyendo control químico y prácticas culturales (Tablas 3.2, y 3.4). Las opciones de control químico incluyen herbicidas selectivos y no selectivos, con y sin efecto residual. La aparición de biotipos resistentes de AVEFA se simula en los Casos II a IV.

Tabla 3.5. Descripción de los casos I a V. Densidad de cultivo: Estándar = 200 pl.m⁻² para trigo y 250 pl.m⁻² para cebada. Alta = 400 pl.m⁻² para trigo y 280 pl.m⁻² para cebada. Fecha de siembra: Normal = 1 de junio para trigo y 1 de julio para cebada. Retrasada = 1 de julio para trigo y 20 de julio para cebada. Habilidad competitiva de la variedad de trigo: Baja = Cooperacion Nanihue. Alta = Buck® Naposta.

	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Caso V
Densidad de siembra del cultivo	Estándar	Estándar	Alta	Alta	Alta
Fecha de siembra del cultivo	normal	normal	normal	normal	tardía
Habilidad competitiva de la variedad de trigo	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta
Intervenciones con herbicidas pos-emergentes (en la secuencia de 5 años)	5	5	5	5	2
Ocurrencia de resistencia a herbicidas en AVEFA	No	Si	Si	Si	No

En todos los casos se simuló una estrategia de barbecho químico típica de los sistemas de siembra directa del sudoeste bonaerense. Las acciones de manejo de malezas en barbecho suelen ser: (i) glifosato (LS 48%, 2 L.ha⁻¹) + flumioxazin (SC 48%, 0,120 L.ha⁻¹) aplicados tres meses antes de la siembra del cultivo. En este primer control, el glifosato controla eficazmente las primeras cohortes de individuos de AVEFA y el efecto residual del herbicida flumioxazin impide la emergencia de nuevas plántulas durante un periodo estimado de dos meses. (ii) Cerca de la fecha de siembra se realiza la aplicación de glifosato (G2: glifosato (SL 48%) 2 L.ha⁻¹) para evitar la competencia temprana con el cultivo.

Los momentos de específicos de aplicación se seleccionaron arbitrariamente: (i) tres meses antes de la siembra y (ii) el día previo a la fecha de siembra, manteniéndolos fijos en todos los experimentos. Si bien podrían emplearse otros criterios para definir las fechas de estas aplicaciones, se empleó esta "regla general" a fin de proporcionar dos momentos razonables de aplicación para el control de AVEFA de aparición temprana y tardía durante el barbecho.

Caso I. Métodos de control químico tradicional en AVEFA susceptible

La Figura 3.6 muestra la dinámica multianual de AVEFA en competencia con los cultivos de cereales. En la simulación, el cultivo de trigo se sembró el 1 de junio en los años 1, 3 y 5, con una variedad de trigo poco competitiva (Cooperación Nanihue), y la cebada se sembró el 1 de julio en los años 2 y 4, ambos con una densidad de siembra estándar (Tablas 3.2 y 3.5). Se simularon dos aplicaciones de un herbicida no selectivo durante el barbecho, la primera combinada con un herbicida residual (G+F: glifosato (SL 48%) + flumioxazin (CS 48%) 2 L.ha⁻¹ + 0,120 L.ha⁻¹). Además, se aplicó sistemáticamente una combinación de herbicidas selectivos en postemergencia dos meses después de la siembra del cultivo. En este caso, las aplicaciones del herbicida selectivo en trigo (Dic: diclofop-metil - CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹) se realizaron en los años 1, 3 y 5 en combinación con el herbicida selectivo en cebada (Pin: pinoxaden - CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) en los años 2 y 4, (Tabla 3.4). Las aplicaciones de herbicidas selectivos buscan proporcionar un control eficiente de los individuos de AVEFA evitando la competencia durante el PCC (25 de octubre a 14 de noviembre en trigo y 20 de octubre a 9 de noviembre en cebada).

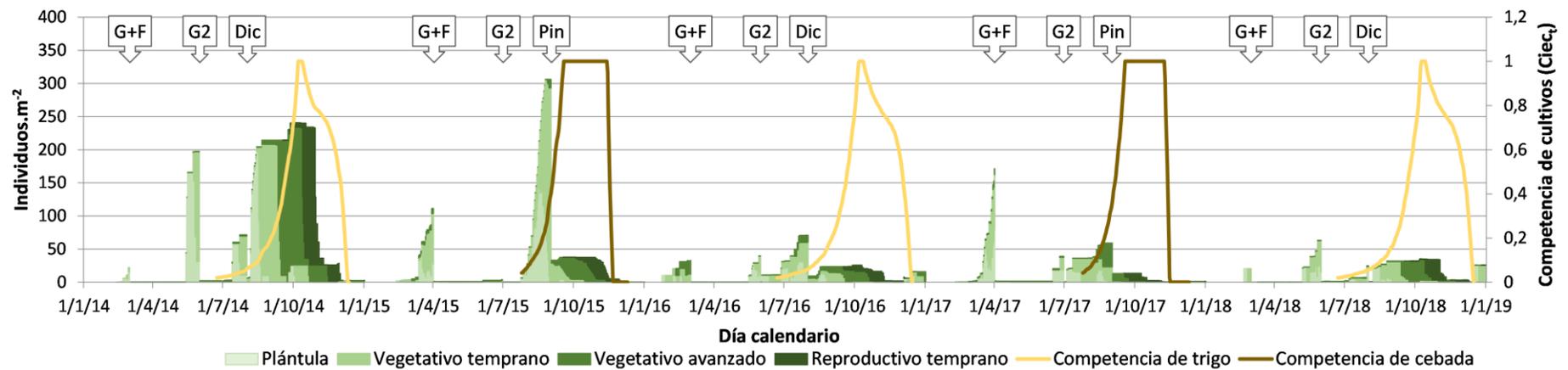


Figura 3.6. Dinámica multianual de AVEFA mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico a partir de un alto contenido de semillas quiescentes (4500 semillas.m⁻²). Se simularon los siguientes controles químicos G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48 %, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹). La evolución del índice de competencia de trigo y cebada se muestran a través de las líneas amarillas y marrones respectivamente. Las flechas indican momento y acción de control.

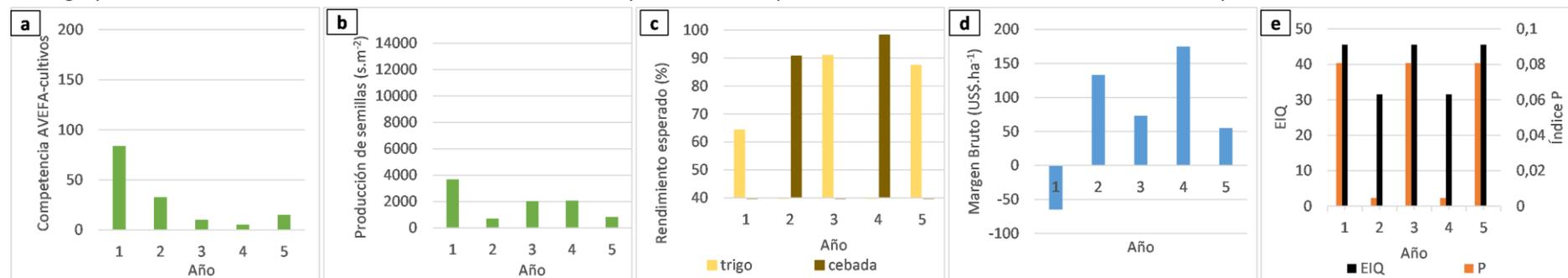


Figura 3.7. Competencia de AVEFA con los cultivos (WC) (a), producción de semillas de AVEFA (Sp) (b), rendimiento esperado de trigo/cebada (Yld) (c), margen bruto (d) y EIQ e Índice P (e). Se simularon varios controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6 %, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹).

Los resultados obtenidos muestran una competencia baja entre AVEFA y el cultivo durante la secuencia (Figura 3.7a), excepto en el año 1, cuando la infestación es intermedia. La producción de semillas de AVEFA fue relativamente baja durante la secuencia de rotación (Figura 3.7b). Los rendimientos esperados del cultivo se consideran aceptables para los años 2 a 5 (Figura 3.7c) dado que se encuentran por encima del 85%. Sin embargo, se obtuvo un bajo rendimiento esperado en el primer año (64%) debido principalmente a la gran infestación inicial de la maleza. Las acciones de control permiten un aumento del rendimiento esperado del 36% en el año 5 en comparación con el año 1.

El margen bruto fue inicialmente negativo debido al efecto competitivo de AVEFA sobre trigo, mostrando posteriormente márgenes positivos. Los márgenes brutos de cebada (años 2 y 4) muestran valores medios a altos (Figura 3.7d).

Los valores de EIQ fueron altos en todos los casos debido a las aplicaciones de glifosato durante el barbecho. Las aplicaciones de herbicidas selectivos en trigo Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹) contribuyeron en gran medida al índice P debido a su alta toxicidad sobre peces y mamíferos, y aportaron 14,77 puntos EIQ generando un mayor impacto en trigo comparado con los 0,73 puntos EIQ obtenidos por la aplicación de Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) en cebada, el cual también generó un muy bajo impacto sobre el índice P (Figura 3.7e).

Caso II. Métodos de control químico tradicional en AVEFA resistente a ACCasas

Para este caso de simulación se reprodujo exactamente la misma condición del Caso I pero considerando una población de AVEFA resistente a FOP/DEN. La resistencia de la maleza se simuló a través de menores eficiencias de control (Tabla 3.4), obtenidas de experimentos de campo reportados en Vigna et al. (2013).

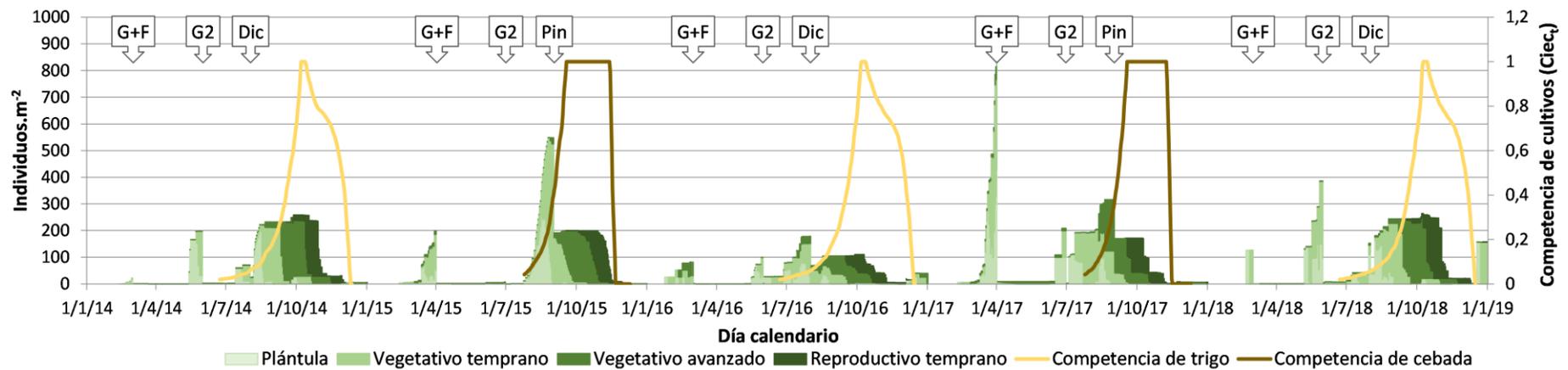


Figura 3.8. Dinámica plurianual del AVEFA resistente mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico a partir de un alto contenido de semillas quiescentes (4500 semillas.m⁻²). Se simularon los siguientes controles químicos G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹). La evolución del índice de competencia de trigo y cebada se muestran a través de las líneas amarillas y marrones respectivamente. Las flechas indican momento y acción de control.

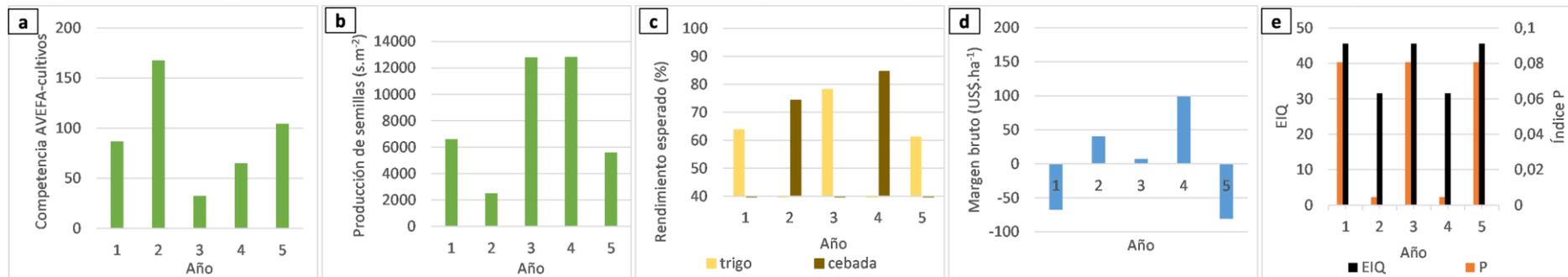


Figura 3.9. Competencia de AVEFA con los cultivos (WC) (a), producción de semilla de AVEFA (Sp) (b), rendimiento esperado de trigo/cebada (Yld) (c), margen bruto (d) y EIQ e Índice P (e). Se simularon varios controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹).

Como se observa en la Figura 3.8, los gramínicidas selectivos realizaron un control menos eficiente debido a la presencia de resistencia. Las menores eficiencias de control se reflejaron sobre la dinámica de poblacional de AVEFA incrementándose el número de individuos sobrevivientes (comparar escalas y dinámicas demográficas de las Figuras 3.6 y 3.8) y generando un mayor efecto competitivo durante el PCC. Los resultados obtenidos muestran una competencia media-alta entre AVEFA y el cultivo durante la secuencia completa (Figura 3.9a). La producción de semillas de AVEFA se mantuvo alta, excepto en el año 2, donde la emergencia simulada a campo mostró la ocurrencia de individuos que emergieron de forma tardía (Figura 3.9b). Se obtuvieron bajos rendimientos (Figura 3.9c) debido a las bajas eficiencias de control, resultando en márgenes brutos bajos e incluso negativos en el año 5 (Figura 3.9d). Los valores de impacto ambiental se mantuvieron iguales que en el caso anterior, ya que la estrategia de aplicación no varió (Figura 3.9e).

Caso III. Control químico y estrategias culturales en AVEFA resistente a ACCasas

Al igual que en los casos anteriores, en esta ocasión el cultivo de trigo se sembró el 1 de junio (años 1, 3 y 5), empleando una variedad poco competitiva (Cooperación Nanihue), mientras que la cebada se sembró el 1 de julio (años 2 y 4). Sin embargo, en este caso ambos cultivos se sembraron con una densidad alta (Tablas 3.2 y 3.5). La densidad de siembra se duplicó en trigo y se incrementó un 12% en cebada, siguiendo criterios típicos empleados en el sudoeste bonaerense (Tablas 3.2 y 3.5). Se aplicó la misma estrategia de control químico que en los casos anteriores. La Figura 3.10 muestra los resultados correspondientes al experimento.

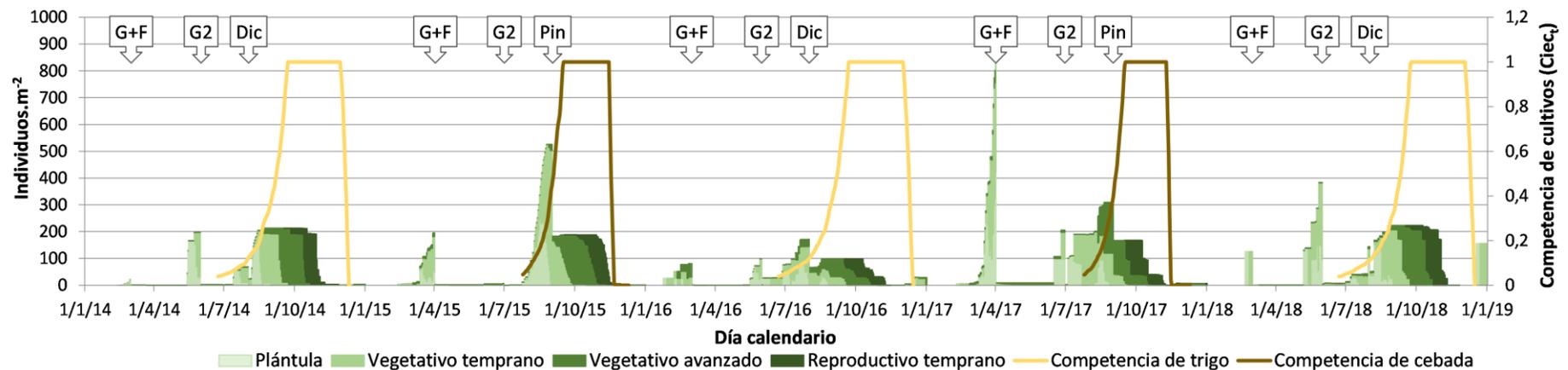


Figura 3.10. Dinámica plurianual del AVEFA resistente mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico a partir de un alto contenido de semillas quiescentes (4500 semillas.m⁻²). Se simuló el efecto combinado de una alta densidad de cultivo y los siguientes controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹). La evolución del índice de competencia de trigo y cebada se muestran a través de las líneas amarillas y marrones respectivamente. Las flechas indican momento y acción de control.

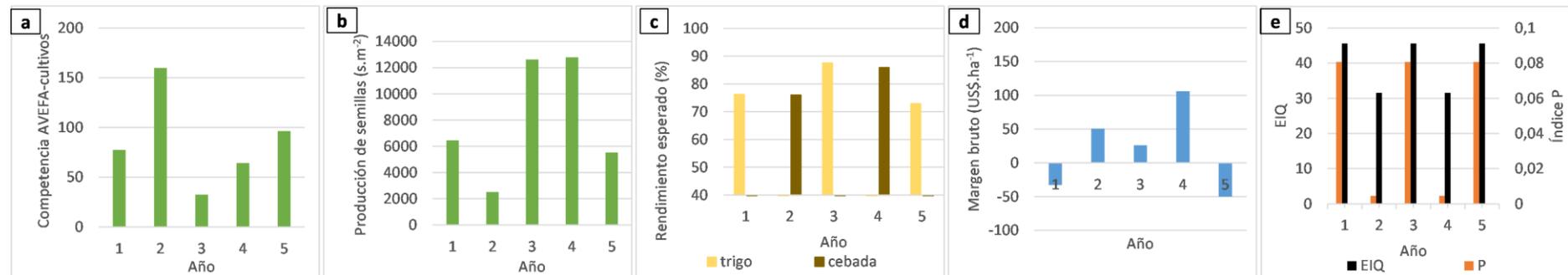


Figura 3.11. Competencia de AVEFA con los cultivos (WC) (a), producción de semillas de AVEFA (Sp) (b), rendimiento esperado de trigo/cebada (Yld) (c), margen bruto (d) y EIQ e Índice P (e). Se simuló el efecto combinado de una alta densidad de cultivo y varios controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹).

Al igual que en el Caso II, los gramínicidas postemergentes realizaron un bajo control debido a la resistencia. Sin embargo, las mayores densidades de siembra se tradujeron en una mayor competencia del cultivo sobre la maleza, lo que se aprecia sobre todo en el caso del cultivo de trigo, como una reducción en la aparición de nuevas plántulas de AVEFA en el cultivo. La simulación del efecto competitivo de la alta densidad de siembra, logró reducir la competencia durante el PCC en comparación con el Caso II (Figura 3.10).

Los resultados muestran un efecto competitivo medio-alto de AVEFA sobre el cultivo durante la secuencia de rotación (Figura 3.11a). La producción de semillas de AVEFA se mantuvo alta durante la secuencia, excepto en el año 2, en el que la emergencia a campo se retrasó (Figura 3.11b). Los rendimientos esperados del cultivo de cebada fueron similares al caso anterior, sin embargo, se obtuvieron mejores rendimientos de trigo a altas densidades de siembra (Figuras 3.9c vs. 3.11c). Los márgenes brutos siguieron siendo bajos o incluso negativos (Figura 3.11d), aunque el rendimiento resultó ligeramente superior al CASO II (Figura 3.9d). Los valores de impacto ambiental siguen siendo los mismos que en los experimentos anteriores (Figura 3.11e).

Caso IV. Manejo químico y cultural en AVEFA resistente a ACCasas

El cultivo de trigo se sembró el 1 de junio en los años 1, 3 y 5, con una variedad de trigo altamente competitiva (Buck Naposta) (López, 1989), y la cebada se sembró el 1 de julio en los años 2 y 4, ambos cultivos con una alta densidad de siembra (Tablas 3.2 y 3.5). Las opciones de control químico se aplicaron cada año como en los Casos I-III.

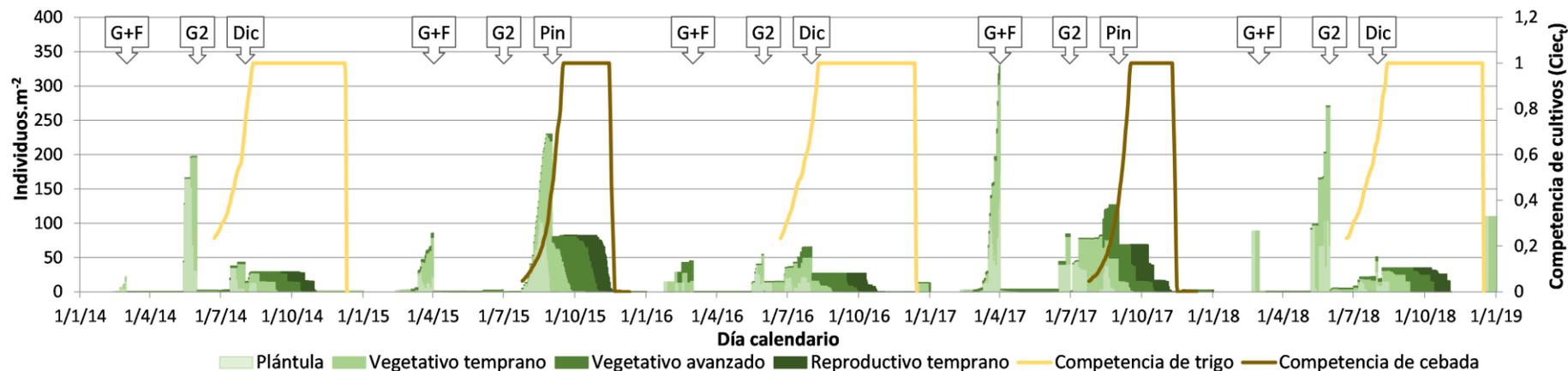


Figura 3.12. Dinámica multianual de AVEFA resistente mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico a partir de un alto contenido de semillas quiescentes (4500 semillas.m⁻²). Se simuló el efecto combinado de una alta densidad de cultivo, una variedad de trigo altamente competitiva y los siguientes controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹). La evolución del índice de competencia de trigo y cebada se observa a través de las líneas amarillas y marrones respectivamente. Las flechas indican momento y acción de control.

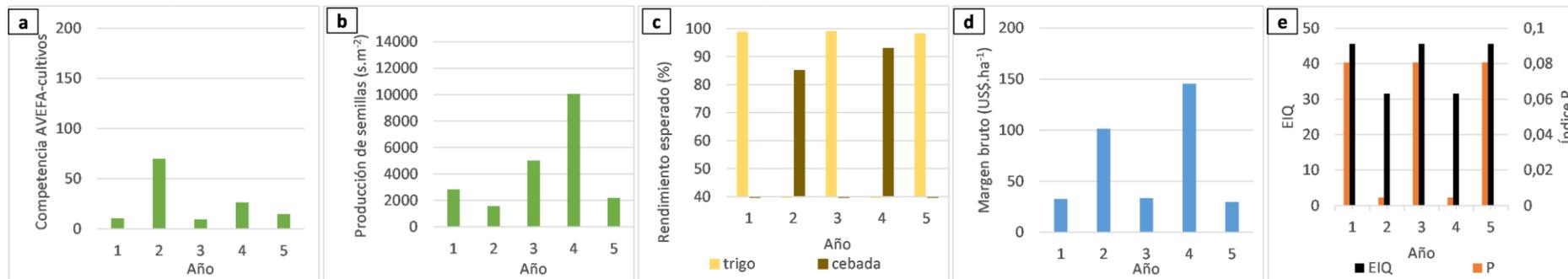


Figura 3.13. Competencia de AVEFA con los cultivos (WC) (a), producción de semillas de AVEFA (Sp) (b), rendimiento esperado de trigo/cebada (Yld) (c), margen bruto (d) y EIQ e Índice P (e). Se simuló el efecto combinado de una alta densidad de cultivo, una variedad de trigo altamente competitiva y los siguientes controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹).

En el presente caso, la combinación de una alta densidad de siembra y una variedad de trigo competitiva generó un efecto supresor más amplio sobre AVEFA. Una alta capacidad competitiva del cultivo indujo un nivel de supresión de malezas significativo a partir de septiembre (Figura 3.12). Esta estrategia redujo la competencia de AVEFA durante el PCC en comparación con los escenarios anteriores. Como se muestra en la Figura 3.13a, los resultados señalan un efecto competitivo medio-bajo de AVEFA sobre el cultivo durante la secuencia de rotación. La producción de semillas de AVEFA fue variable durante la secuencia (Figura 3.13b). Los rendimientos esperados del cultivo fueron de moderados a altos en cebada y trigo, respectivamente (Figura 3.13c). Los márgenes brutos mostraron mejores valores que en los casos anteriores (Figura 3.13d), sin embargo, los valores de impacto ambiental se mantuvieron altos (Figura 3.13e).

Caso V: Manejo químico y cultural en AVEFA susceptible

Al igual que el caso anterior, se sembró trigo de variedad altamente competitiva (Buck® Naposta) (López, 1989) en los años 1, 3 y 5, y cebada en los años 2 y 4, ambos con una alta densidad de siembra (Tablas 3.2 y 3.5). Respecto de los experimentos anteriores, las fechas de siembra de los cultivos se retrasaron 30 días en trigo y 20 días en cebada, como estrategia cultural adicional al Caso IV. También se aplicaron métodos químicos cada año (de forma similar a los casos anteriores) aunque se utilizaron graminicidas selectivos sólo cuando se identificó la presencia de una gran cantidad de individuos de AVEFA (≈ 200 individuos.m⁻²) durante el establecimiento del cultivo.

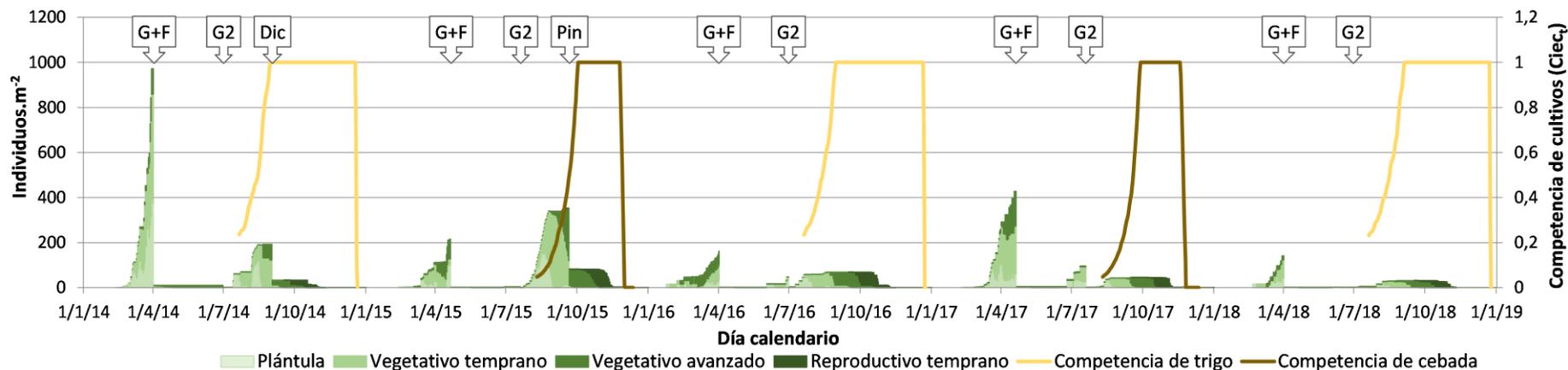


Figura 3.14. Dinámica multianual de AVEFA mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico a partir de un alto contenido de semillas quiescentes (4500 semillas.m⁻²). Se simuló el efecto combinado de una fecha de siembra tardía, una alta densidad de cultivo, una variedad de trigo altamente competitiva y los siguientes controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹). La evolución del índice de competencia de trigo y cebada se muestran a través de las líneas amarillas y marrones respectivamente. Las flechas indican momento y acción de control.

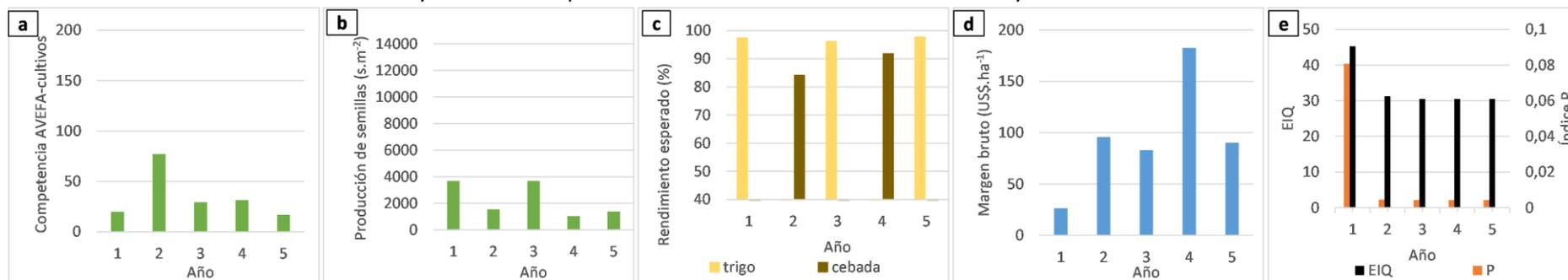


Figura 3.15. Competencia del AVEFA con los cultivos (WC) (a), producción de semillas de AVEFA (Sp) (b), rendimiento esperado de trigo/cebada (Yld) (c), margen bruto (d) y EIQ e Índice P (e). Se simuló el efecto combinado de una fecha de siembra tardía, una alta densidad de cultivo, una variedad de trigo altamente competitiva y varios controles químicos: G+F (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹ + flumioxazin SC 48% 0,120 L.ha⁻¹), G2 (glifosato LS 48%, 2 L.ha⁻¹), Pin (pinoxaden CE 6%, 0,8 L.ha⁻¹) o Dic (diclofop-metil CE 28,4%, 2 L.ha⁻¹).

Como se observa en la Figura 3.14, los herbicidas selectivos realizaron un control eficiente en una población susceptible de AVEFA. La fecha de siembra tardía del cultivo permitió el control de una mayor proporción de AVEFA durante el barbecho, dejando una cantidad relativamente baja de individuos durante la fase de cultivo. La alta densidad de siembra y la variedad de trigo altamente competitiva suprimieron eficazmente los individuos de AVEFA durante la fase de cultivo. La estrategia de manejo de la maleza logro reducir el número de individuos de AVEFA evitando la competencia durante el PCC (21 de octubre a 10 de noviembre en trigo y 23 de octubre a 12 de noviembre en cebada).

Los resultados muestran un nivel de competencia AVEFA-cultivo medio-bajo durante la secuencia de rotación (Figura 3.15a) y una baja producción de semillas a lo largo de los años (Figura 3.15b). Los rendimientos esperados fueron de medios a altos en ambos cultivos (Figura 3.15c) dando lugar a altos márgenes brutos, excepto en el año 1 (Figura 3.15d). Tanto el índice P como el EIQ muestran valores más bajos que en todos los casos anteriores desde el año 3 al 5 (Figura 3.15e) debido a la reducción en el uso de controles químicos.

Evaluación y comparación de los escenarios AVEFA-cereal

En la Figura 3.16 se detallan, con fines comparativos, valores promedio de los indicadores agronómicos, económicos y ambientales correspondientes a los cinco casos estudiados.

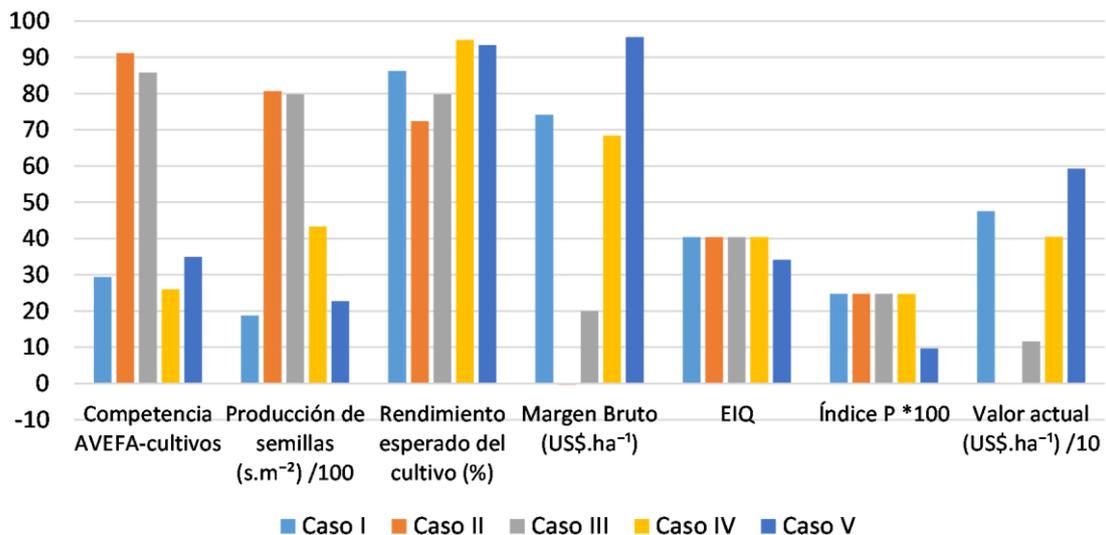


Figura 3.16. Variables de salida del modelo generadas a partir de los Casos simulados I-V. Las variables de salida representadas son: Competencia del AVEFA con los cultivos (WC), producción de semillas de AVEFA (Sp) actual (dividida por 100 para adaptarla a la escala), rendimiento esperado de trigo/cebada (Yld), margen bruto, EIQ, índice P y valor actual (multiplicados por 100 y divididos por 10 para adaptarlos a la escala). Cada barra corresponde a una media de cinco años de cada caso de estudio.

El menor efecto de competencia de AVEFA sobre el cultivo se obtuvo en el Caso IV debido a la combinación de medidas químicas y culturales. Los Casos I y V (población susceptible) presentaron los valores más altos de margen bruto y la producción de semillas de AVEFA se redujo significativamente. Los rendimientos esperados fueron relativamente altos en los Casos I, IV-V. En el caso II la ocurrencia de resistencia a ACCAsa dificultó el control dado que no se aplicaron medidas culturales. El mayor valor del margen bruto se obtuvo en el Caso V, donde resultó una mejora considerable por la combinación de la medida de retraso de siembra sobre la población susceptible, sumada a la baja presión de herbicidas. Dichas medidas también mejoraron los valores de impacto ambiental, tanto EIQ como índice P. Al comparar los Casos I y V (población susceptible), aunque existen diferencias significativas en el enfoque de manejo, los resultados globales se consideran satisfactorios en ambos. Sin embargo, el Caso V fue claramente la mejor opción de manejo con una reducción significativa del banco de semillas de AVEFA frente al Caso I que representa una estrategia convencional basada en herbicidas post emergentes. Además, en el Caso V se obtuvo el mayor margen bruto y valor actual, como

también el menor impacto ambiental, EIQ e índice P. En los casos con resistencia (II, III y IV), el caso IV representó con diferencia la estrategia más eficiente como resultado de la aplicación de un enfoque de MIM.

3.5 **Discusión y Conclusión**

En el presente capítulo se logró adaptar, calibrar y validar el modelo desarrollado para las características y particularidades de un agroecosistema típico del sudoeste bonaerense. Específicamente, se logró simular la dinámica multianual de la maleza *Avena fatua* (AVEFA) en competencia con los cultivos de trigo pan y cebada cervecera en rotación, bajo estrategias de manejo típicas de la región.

Una de las adaptaciones realizadas en este capítulo fue en el proceso de producción de semillas mediante la incorporación de cohortes reproductivas. Como ha sido indicado por Burns et al. (2018), uno de los mecanismos fundamentales para reducir la infestación de AVEFA consiste en disminuir la producción de semillas, práctica que adquiere aún más relevancia en presencia de poblaciones resistentes. Varios trabajos previos han expuesto la importancia de dividir los grupos de cohortes reproductivas de AVEFA en función de las condiciones de desarrollo (Cousens et al., 1992; Weaver et al., 1993; Menegat et al., 2017). Esta adaptación ha sido incorporada al modelo y su accionar se evidencia en los resultados de las simulaciones realizadas.

Adicionalmente, la mayor capacidad competitiva del cultivo de cebada en comparación con el cultivo de trigo estándar, observada a nivel experimental e implementada en trabajos de simulación previos (Satorre y Snaydon, 1992; Matsushashi et al., 2021) fue representada en el enfoque propuesto a través del índice de $CieC_t$.

En lo que respecta a la densidad de siembra, una alta densidad se caracteriza por aumentar la competencia interespecífica de los cultivos sobre la maleza, favoreciendo alcanzar niveles iniciales altos de competencia. Al aumentar la competencia, se producen disminuciones en la incorporación de individuos maleza al sistema, disminuyendo los

niveles de infestación de AVEFA, tal lo observado experimentalmente e *in silico* por Burns et al. (2018).

Otro método de manejo cultural utilizado en este capítulo fue la modificación del momento de siembra de los cultivos. A partir de los resultados obtenidos, se observó que la modificación del momento de siembra puede representar una estrategia de manejo de vital importancia si se conjuga con una predicción acertada de los flujos de emergencia a campo (Royo-Esnal et al., 2020). Por lo tanto, contar con modelos de emergencia confiables es imprescindible para realizar un buen uso de esta práctica cultural, dado que en parte determinará la efectividad de dicho manejo. Particularmente, el atraso de la fecha de siembra, permite realizar acciones de control que durante el crecimiento del cultivo no podrían ser utilizadas. Ampliar las posibilidades de control, evita depender de determinados principios activos, aumentando su vida útil y evitando agravar situaciones de resistencia (Burns et al., 2018).

El análisis de los casos de estudio permitió concluir que, bajo situaciones de alta infestación, el control postemergente con herbicidas resultó indispensable para lograr resultados económicos razonables, aunque no necesariamente debieron aplicarse todos los años del horizonte estudiado. Los mejores resultados económicos y de control de malezas con impacto ambiental moderado se obtuvieron combinando medidas de control químico y cultural. Análogamente, en D'Amico et al. (2021) se lograron niveles adecuados de control de raigrás anual (*Lolium spp*) a través de la combinación de medidas integradas basadas en control químico y cultural en cultivos de cebada.

En conclusión, el modelo desarrollado permitió realizar experimentos *in silico* con el objetivo de comparar y evaluar las estrategias de manejo simuladas mediante índices agronómicos, económicos y ambientales. Los resultados obtenidos indican que, con respecto a un manejo "clásico", la incorporación de medidas de manejo cultural (modificación de fecha de siembra, aumento de densidad de siembra, y uso de cultivares altamente competitivos) en combinación con una evaluación año a año de la conveniencia de aplicación o no de herbicidas postemergente, permitiría: (i) Aumentar el margen bruto promedio; (ii) reducir el número de aplicaciones, (iii) disminuir el impacto ambiental,

indistintamente de la ocurrencia de poblaciones resistentes a ACCasas. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Menegat et al. (2017) y Burns et al. (2018).

Una futura línea de trabajo podría ser la incorporación del efecto del nitrógeno sobre la dinámica poblacional de AVEFA. Se ha demostrado que la fertilización nitrogenada puede afectar la supervivencia de plántulas, dispersión y producción de semillas de AVEFA (Scursoni y Benech Arnold, 2002). Si bien la AVEFA puede ser sensible a la disponibilidad de nitrógeno, Burns et al. (2018) menciona que los efectos pueden ser contradictorios y recomienda continuar investigando el fenómeno.

Asimismo, se ha destacado la necesidad de simular la biomasa de AVEFA y su relación con la producción de semillas, a fin de incorporar acciones de control químico con dosis reducidas. Dichas acciones de control pueden modificar la acumulación de biomasa y, por consiguiente, la producción de semillas de los individuos que sobreviven a una aplicación (Menegat et al., 2017). Este efecto podría ser incorporado en un futuro modelo, ya que existen estudios regionales que evalúan el impacto de los herbicidas en la acumulación de biomasa y la producción de semillas de los individuos sobrevivientes (Candisano y Scursoni, 2017; Scursoni et al., 2021).

CAPÍTULO 4

Sistema *Euphorbia davidii* Subils – Soja

Se presenta la adaptación, calibración y validación del modelo de simulación al agrosistema *Euphorbia davidii* Subils – Soja para la región centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se utilizó información demográfica de la maleza y del cultivo relevada a campo durante dos ciclos de cultivo (2011/2012 y 2013/2014). Se generaron tres escenarios de simulación anual y un caso multianual con el objetivo de evaluar las prestaciones del modelo. Se estudió el efecto de diversas estrategias de manejo sobre las principales variables de salida: competencia interespecífica, rendimiento, resultado económico e impacto ambiental. Se contrastaron los rendimientos esperados simulados vs los observados. Los resultados obtenidos *in silico* sugieren que la inclusión de medidas de manejo cultural sumadas al manejo clásico (basado en herbicidas), podría reducir tanto la competencia interespecífica sobre el cultivo (46-97 %) como la producción de semillas de la maleza (40- 89 %), así como generar incrementos en el rendimiento esperado (6 -20 %) y en el margen bruto (44 - 199 US\$.ha⁻¹) a niveles similares de impacto ambiental. Finalmente, se lograron identificar zonas de información faltante para futuros trabajos puntualizando posibles ampliaciones con el objetivo de mejorar el soporte a la toma de decisiones en sistemas agrícolas de la región.

4.1. Introducción

Euphorbia davidii Subils pertenece a la familia *Euphorbiaceae* Juss., esta última representada por aproximadamente 8900 especies a nivel mundial (Govaerts et al., 2000). Entre ellas se encuentran especies de importante valor económico y otras que

afectan a los cultivos comportándose como malezas (Tanveer et al., 2013; Cavalcante et al., 2020; Palma-Bautista et al., 2020).

En Argentina se han citado cuatro especies que se destacan como malezas importantes en cultivos de verano (*Euphorbia serpens* Kunth, *Euphorbia heterophylla* L., *Euphorbia dentata* Michaux y *Euphorbia davidii* Subils). Dichas especies comparten gran cantidad de características comunes, lo cual ha dificultado su correcta identificación contribuyendo a la confusión en aspectos bioecológicos y demográficos, por ende dificultando el diseño adecuado de estrategias específicas de manejo (Marchessi et al., 2011).

Euphorbia davidii (EPHDV) ha sido citada como especie invasora en múltiples regiones del mundo (Oprea et al., 2012; Barina et al., 2013; Vladimirov et al., 2014; Bondarenko y Myronov, 2021). En Argentina, específicamente en la región centro bonaerense fue identificada originalmente como sinónimo de *E. dentata* por Mayfields (1997). Sin embargo, a posteriori los ejemplares fueron reidentificados como EPHDV y relevamientos la destacan como la especie omnipresente en el centro-sur bonaerense (Marchessi et al., 2011).

Trabajos realizados por el grupo de Terapéutica Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, mencionan que la misma fue detectada originalmente en focos aislados en la década del 80, y actualmente se encuentra distribuida en el 85 % del área agrícola del partido de Azul. También está registrada su presencia en otros distritos: Olavarría, Tandil, Balcarce, Bolívar, 25 de Mayo, Benito Juárez, González Chaves, Laprida, General Lamadrid, Tres Arroyos, Coronel Suarez, Saavedra, Adolfo Alsina, Coronel Pringles y Bahía Blanca (Juan y Saint Andre, 1995; Juan y Saint-André, 1997; Marchessi et al., 2011). No se descarta su existencia no documentada en otros partidos.

EPHDV es considerada una maleza altamente competitiva y de difícil control en los agrosistemas del centro de la provincia de Buenos Aires (Núñez-Fré, 2019; Núñez Fré

et al., 2022). En general, se observa una estrecha relación entre el estado fenológico, la dosis y la eficacia del control (Frank et al., 2013; Istilart et al., 2014; Núñez-Fré et al., 2018). La significativa disminución en la sensibilidad con el avance fenológico ocasiona gran variabilidad de resultados en los tratamientos con glifosato e imazetapir cuando son aplicados en post-emergencia a las dosis recomendadas (Juan y Saint-André, 1997; Juan et al., 2002). Para el control químico con glifosato, Juan et al. (2011) recomiendan aplicaciones desde la emergencia de la maleza hasta el inicio de ramificación, lográndose mayores controles al estado de 2-4 hojas con eficiencias cercanas al 90%. Es recomendable evitar que la maleza llegue al estado de inicio de floración porque para obtener niveles de control aceptables serían necesarias dosis superiores a $2000 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ (Juan et al., 2011). Además, en estados fenológicos avanzados se ha observado la regeneración adventicia de plantas afectadas por el herbicida, lo cual sugiere que la maleza podría metabolizar el producto y sobrevivir a los tratamientos, tal como ha sido reportado para *E. heterophylla* (Langston et al., 1984).

A las dificultades de control antes mencionadas se le añade la alta competencia interespecífica que puede generar EPHDV sobre los cultivos. El efecto de interferencia competitiva sobre soja, bajo condiciones semicontroladas, indican reducciones respecto del testigo limpio que oscilan el 35-45 % de rendimiento con densidades \geq a 100 plantas. m^2 de EPHDV (Juan y Saint-André, 1995; Juan et al., 2003). Además, se han detectado variaciones significativas en el número de vainas/planta, semillas/vaina, hojas trifoliadas y en menor medida el P1000 por efecto de la competencia sobre el cultivo de soja (Juan y Saint-André, 1995; Juan et al., 2003; Núñez-Fré et al., 2018). En experimentos a campo, Juan et al. (2003) reportaron pérdidas de rendimiento cercanas a los 700 kg. ha^{-1} , representando más de un 30 % de reducción de rendimiento en soja. Dichos autores observaron efectos significativos en la pérdida de rendimiento a partir de infestaciones $\geq 8 - 10$ plantas. m^{-2} , lo cual indica una alta habilidad competitiva de la maleza. El principal componente del rendimiento afectado fue el número de vainas/planta que registró diferencias del 15 % respecto del testigo a partir de 20 plantas. m^{-2} de EPHDV (Juan et al., 2003).

Si bien, aún no se han registrado biotipos resistentes a herbicidas en EPHDV, existen casos registrados de resistencia en una especie emparentada botánicamente, *E. heterophylla*, que además muestra cercanía geográfica con EPHDV. Según Heap¹, el primer caso de resistencia en dicha especie se registró en 1990 al herbicida linuron en Ecuador. Posteriormente se registraron casos de resistencia a herbicidas ALS en Brasil y Paraguay (1993 y 1995 respectivamente); resistencia múltiple a herbicidas ALS y PPO (2004) y resistencia a glifosato (2019) en Brasil.

Por lo anterior, se considera que la maleza EPHDV es una especie de gran importancia para la región centro bonaerense, y que el empleo de herramientas de asistencia a la toma de decisiones basadas en modelos de simulación podría beneficiar en gran medida la planificación de un manejo integrado sostenible en el tiempo.

El presente capítulo tiene como objetivos: (i) evaluar la capacidad de adaptación del modelo general a al sistema cultivo/maleza de ciclo primavero-estival, *Euphorbia davidii*-Soja, típico de la región centro bonaerense; (ii) validar el modelo con datos independientes, (iii) generar escenarios anuales y multianuales para comparar el efecto de diferentes estrategias de manejo.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Adaptación del modelo

En la presente sección se describe la adaptación del modelo general propuesto, al sistema *Euphorbia davidii* en competencia con el cultivo de soja típico de la región central de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Algunos procesos fueron modificados respecto del modelo general expuesto en el capítulo anterior a fin de optimizar la

¹ <https://www.weedscience.org/Pages/Species.aspx>

adaptación al sistema en cuestión. Las principales características distintivas y las modificaciones introducidas al modelo de base se detallan en las secciones subsiguientes.

4.2.2. Diagrama anual, variables y parámetros

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama representativo del modelo de simulación propuesto, adaptado al sistema anual primavera-estival EPHDV-Soja. Los parámetros demográficos de EPHDV y el cultivo de soja se detallan en las Tablas 4.1 y 4.2 respectivamente.

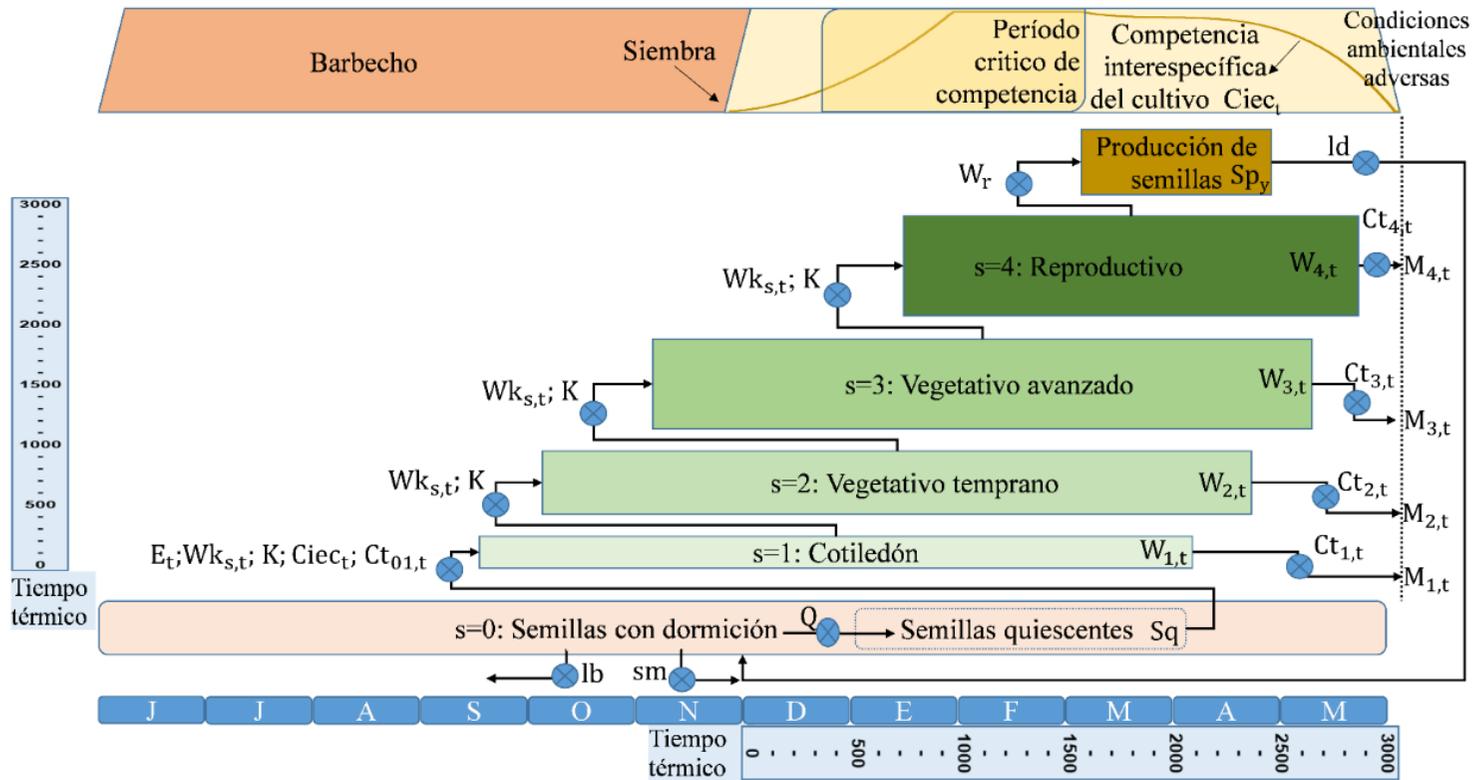


Figura 4.1. Diagrama general ilustrando los principales componentes del modelo de simulación, considerando la maleza EPHDV en competencia con el cultivo de soja, a lo largo de una campaña agrícola (ver Tabla 1.1 para descripción de las variables y Tablas 4.1 y 4.2 para descripción de parámetros). Sobre la izquierda se observa la escala de tiempo- térmico utilizada para guiar el desarrollo de la maleza.

En la base se observan escalas de tiempo-térmico y cronológico utilizadas para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Sobre la parte superior se observa una clara distinción entre los momentos de barbecho y cultivo. En el ciclo de cultivo se detallan momento de siembra, período crítico de competencia (PCC) e índice de competencia interespecífica del cultivo ($Ciec_t$). El ciclo de vida de la maleza se representa de una manera simplificada definiendo los estados más representativos ($W_{s,t}$), siendo s=0: Banco de semillas; s=1: Cotiledonar (cotiledones); s=2: Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas); s=3: Vegetativo avanzado (6 hojas verdaderas a ramificación); s=4: Reproductivo (floración y fructificación).

Tabla 4.1. Parámetros de *Euphorbia davidii*. CE= conocimiento experto. e = estimado, usado solamente en las simulaciones multianuales.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad	Fuente
ns	Número de estados fenológicos	4	-	(Núñez-Fré, 2019)
T _b	Temperatura base cardinal para la acumulación de tiempo-térmico	8	°C	(Marchessi et al., 2011)
Th ₁	s=1 a s=2. Cotiledón a 2-4 Hojas	192	°Cd	(Núñez-Fré, 2019)
Th ₂	Tiempo-térmico requerido por una cohorte diaria para pasar de s=2 a s=3. 2-4 Hojas a 6 Hojas – Ramificación	300	°Cd	(Núñez-Fré, 2019)
Th ₃	s=3 a s=4. 6 Hojas – Ramificación a Reproductivo	700	°Cd	(Núñez-Fré, 2019)
t _f	Umbral de inducción floral	Sin restricción	Día juliano	(Núñez-Fré, 2019)
L	Longevidad del banco de semillas	5	años	CE
Q ₁	Proporción de semillas que se encuentran quiescentes en el año cero, producidas en el año	y=-1	0,5	e
Q ₂		y=-2	0,2	
Q ₃		y=-3	0,15	
Q ₄		y=-4	0,10	
Q ₅		y=-5	0,05	
sm	Tasa de mortalidad anual del banco de semillas	0,0732	-	
ld	Tasa de pérdida de semillas al momento de la dispersión natural	0,77	-	e
lb	Tasa de pérdida de semillas por factores bióticos durante el primer barbecho (predación, mortalidad)	0,2075	-	e

Continuación Tabla 4.1. Parámetros de *Euphorbia davidii*. CE= conocimiento experto. E = estimado, usado solamente en las simulaciones multianuales.

Parámetro	Descripción		Valor	Unidad	Fuente
K	Capacidad de porte del agroecosistema.		150	i.m ⁻²	(Núñez-Fré, 2019)
f ₁		s=1	0,1	-	(Núñez-Fré, 2019)
f ₂	Factor de competencia para	s=2	0,5	-	(Núñez-Fré, 2019)
f ₃		s=3	0,75	-	(Núñez-Fré, 2019)
f ₄		s=4	1	-	(Núñez-Fré, 2019)
nr		Número de grupos de cohortes reproductivas		1	.
Ta	Día juliano en que se producen las condiciones ambientales adversas		-	Día juliano	CE
Tminss	Temperatura mínima que causa estrés térmico		-1	°C	CE
Tmaxss	Temperatura máxima que causa estrés térmico		40	°C	CE
mstress ₁	Tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas, en	s=1	1	-	CE
mstress ₂		s=2	0,6	-	CE
mstress ₃		s=3	0,4	-	CE
mstress ₄		s=4	0	-	CE

Tabla 4.2. Parámetros del cultivo de soja (momento de siembra, standard y siembra tardía). CE= conocimiento experto. * = adaptado de.

Parámetro	Descripción	Valor		Unidad	Fuente	
		Standard	Tardía			
G1	Tiempo-térmico acumulado al momento de cambiar de función	1325	780	°Cd	DSSAT*	
G2	Tiempo-térmico acumulado requerido para alcanzar la madurez fisiológica del cultivo	2750	1900	°Cd	DSSAT*	
PCC	Período crítico de competencia del cultivo	450- 1730	450- 1120	°Cd	DSSAT*	
Sf _t	Susceptibilidad del cultivo entre el día 0 y el día t, previo al PCC	1		-	CE	
Sf _t	Susceptibilidad del cultivo durante los días t del PCC	5		-	CE	
Sf _t	Susceptibilidad del cultivo entre el día t, posterior al PCC y el día de madurez fisiológica del cultivo	1		-	CE	
LAIhc	Valor de TPLA que representa una situación de alta competencia	Distancia entre hileras=35 cm	0,9	0,9	-	CE y (Meira et al., 2019)
		Distancia entre hileras=52,5 cm	1,5	-	-	
		Distancia entre hileras=70 cm	2,2	-	-	
α	Parámetro de LAI _t	0,2x10 ⁻⁵	6,46x10 ⁻⁸	-	DSSAT*	
ω	Parámetro de LAI _t	-0,4x10 ⁻³	2,48	-	DSSAT*	
β	Parámetro de LAI _t	20,8	-8,18	-	DSSAT*	
γ	Parámetro de LAI _t	0,0272	0,0164	-	DSSAT*	
δ	Parámetro de LAI _t	1,32x10 ⁻⁵	6,01x10 ⁻⁶	-	DSSAT*	
ε	Parámetro de LAI _t	2,14x10 ⁻⁹	0	-	DSSAT*	
Myl	Máxima proporción de pérdida de rendimiento	60			Cal. Y Valid.	
a	Constante derivada del cultivo	0			Cal. Y Valid.	
k	Constante de competencia del cultivo		0,1	-	Cal. Y Valid.	
GY	Rendimiento esperado		3000	Kg.ha ⁻¹	Cal. Y Valid	

4.2.3. Información agrometeorológica

Como base para la simulación se utilizó información agrometeorológica diaria obtenida de dos fuentes: (i) Estación Meteorológica Olavarría (36°53'20''S; 60°13'40''O), dependiente del Servicio Meteorológico Nacional y (ii) Estación Meteorológica del Centro Regional de Agrometeorología (36°47'00''S; 59°51'00''O), perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA)², ambas de acceso libre.

4.2.4. Emergencia de la maleza

Para predecir los patrones de emergencia de EPHDV ajustó un modelo propio utilizando la metodología basada en redes neuronales artificiales propuesta en Chantre et al. (2018). Los datos de emergencia para ajustar el modelo se obtuvieron en relevamientos a campo de Núñez-Fré (2019). El modelo utiliza como variables de entrada directamente los datos meteorológicos (temperaturas mínimas y máximas diarias; precipitación diaria) y el día juliano, correspondientes al período comprendido entre 1 de julio y 30 de junio del año siguiente. La emergencia relativa diaria (E_t), expresada como proporción del total de semillas quiescentes (S_q), es la variable de salida de la red. La estructura de la red es simple, compuesta por una única capa interna neuronas. Los parámetros del modelo (pesos y bias) fueron ajustados con un algoritmo de regularización bayesiano.

² <http://www1.faa.unicen.edu.ar/centro/centroreg.php> (accedido última vez el 3 mayo 2021, en español)

4.2.5. Dinámica poblacional

La dinámica poblacional de EPHDV se simula a través de cohortes diarias. Los individuos de cada cohorte pasan a través de cuatro estados fenológicos durante el ciclo de vida, siendo $s=1$: Cotiledonar (Cotiledón); $s=2$: Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas); $s=3$: Vegetativo avanzado (6 hojas verdaderas a ramificación); $s=4$: Reproductivo (floración y fructificación). Para pasar de un estado fenológico al siguiente cada cohorte debe acumular una determinada cantidad de tiempo-térmico (Th_s). Al momento de pasar de un estado fenológico al siguiente, cada cohorte se verá afectada además por tasas de mortalidad y competencia ($Ct_{s,t}$, $Cr_{01,t}$, $mstress_1$), como se detalla en el Capítulo 2. Valores de referencia de estos parámetros se reportan en la Tabla 4.2.

4.2.6. Competencia intraespecífica

Como se mencionó en el Capítulo 2, el efecto de la competencia que ejercen los individuos de la maleza entre sí se calcula mediante una tasa de mortalidad $ia_{s,t}$. Para una mejor adaptación a la dinámica poblacional de EPHDV, la Ecuación 2.7 fue remplazada por la Ecuación 4.1. La Ecuación 4.1 se desarrolló específicamente para simular de forma más efectiva la dinámica poblacional de la maleza en condiciones de alta infestación, típicas de esta especie en la zona de interés. Núñez-Fré (2019) ha identificado la presencia de cohortes diarias de entre 200 y 400 individuos. m^{-2} , parches mayores a 800 individuos. m^{-2} en estado de cotiledón llegando a contabilizarse hasta 28000 semillas. m^{-2} en el banco de semillas del suelo. Estos ejemplos muestran que EPHDV puede alcanzar niveles de infestación mucho más altos que *A. fatua*. Por lo tanto, fue necesario adaptar la representación de la competencia intraespecífica. En el Anexo II se presentan casos de estudio que ilustran la aplicación de la Ecuación 4.1 para simular escenarios con distintos niveles de infestación.

$$ia_{s,t} = \max \left\{ 1 - \left(\frac{Wk_{s,t}}{K} \right); 0 \right\} \quad \forall s, \forall t \quad (4.1)$$

En la Ec. 4.1, $Wk_{s,t}$ es la densidad ponderada de la maleza entre s y ns en t ; y K capacidad de porte del agroecosistema. La relación entre $Wk_{s,t}$ y K determina entonces la tasa de mortalidad por competencia intraespecífica. La función máximo garantiza que el ingreso de nuevas plántulas es nulo cuando la población supera la capacidad de porte. Esta situación, poco común, ocurre únicamente cuando las primeras cohortes son muy abundantes.

4.2.7. Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza

El índice de competencia interespecífica del cultivo ($Ciec_t$) se calcula como una tasa de supervivencia sobre el estado cotiledonar de la maleza (Figura 4.1). La magnitud de $Ciec_t$ depende tanto de la densidad de siembra del cultivo como del LAI_t y LAI_{hc} como se detalla en el Capítulo 2.

Para la simulación del LAI_t del cultivo de soja, se utilizaron ecuaciones ajustadas a partir de simulaciones en DSSAT. El modelo DSSAT se adaptó al agrosistema con: (i) información agrometeorológica (Sección 4.2.3); (ii) información genética y de manejo (Confalone et al., 2016 y Meira et al., 2019); y (iii) un perfil de suelo representativo para la zona de estudio³.

A partir de los resultados de 10 años de simulaciones en DSSAT (2010-2020), se estimó el estado fenológico y se ajustó una función de LAI_t , según la acumulación de tiempo térmico del cultivo (D_t). Los estados del cultivo se establecieron como: (i) emergencia, (ii) período crítico de competencia (PCC), y (iii) madurez fisiológica y cosecha. La función de LAI_t se ajustó mediante parámetros de funciones polinómicas utilizando el optimizador numérico Excel SOLVER®. El LAI_t del cultivo de soja se simula

³ <http://sisinta.inta.gob.ar/es/perfiles/2712> (accedido marzo de 2023)

mediante las siguientes ecuaciones simplificadas según el momento de siembra de soja: estándar (Ecuación 4.2) y tardía (Ecuación 4.3):

$$LAI_t = \begin{cases} \alpha \cdot D_t^2 - \omega \cdot D_t, & \text{Si}(D_t < G1) \\ \beta - \gamma \cdot D_t + \delta \cdot D_t^2 - \varepsilon \cdot D_t^3, & \text{Si}(D_t \geq G1) \\ 0, & \text{Si}(D_t \geq G2) \end{cases} \quad \forall t \quad (4.2)$$

$$LAI_t = \begin{cases} \alpha \cdot D_t^\omega, & \text{Si}(D_t < G1) \\ \beta - \gamma \cdot D_t + \delta \cdot D_t^2 - \varepsilon \cdot D_t^3, & \text{Si}(D_t \geq G1) \\ 0, & \text{Si}(D_t \geq G2) \end{cases} \quad \forall t \quad (4.3)$$

donde α , ω , β , γ , δ , ε son los parámetros de ajuste; D_t es la acumulación del tiempo térmico del cultivo ($^{\circ}\text{Cd}$) en el día t ; $G1$ es el tiempo térmico acumulado en el día de mayor LAI_t ; y $G2$ es el tiempo térmico acumulado necesario para alcanzar la madurez fisiológica en la soja. Los parámetros de las Ecuaciones 4.2 y 4.3 se detallan en la Tabla 4.3.

El parámetro LAI_{hc} es utilizado como un valor límite máximo en la competencia cultivo-maleza. El valor de LAI_{hc} se ajustó utilizando la metodología expuesta en la sección 2.5, en función del distanciamiento entre hileras, densidad y momento de siembra seleccionado. Los valores ajustados se reportan en la Tabla 4.2.

Finalmente, a partir de los parámetros LAI_t y LAI_{hc} en función de D_t , se obtiene la magnitud de Cie_{ct} que afecta a la maleza en el estado cotiledonar ($s=1$).

4.2.8. Producción de semillas

Hacia el fin de ciclo de la maleza se calcula la producción de semillas en función de la densidad de individuos que alcanzan el estado reproductivo. Para el cálculo se utiliza la Ecuación 4.4, adaptada de Nuñez-Fré (2019):

$$Sp_y = \begin{cases} (-80,37 \cdot \log W_r + 220,6) \cdot \log W_r, & \text{Si}(W_r \leq 18) \\ 4870 \cdot \log W_r - 3952, & \text{Si}(W_r > 18) \end{cases} \quad \forall r, \forall y \quad (4.4)$$

donde Sp_y es la producción de semillas en el año y ; y W_r es la densidad de individuos en la cohorte reproductiva r .

En la Figura 4.2 se puede observar gráficamente la producción de semillas en función de la densidad poblacional correspondiente a la Ecuación 4.4.

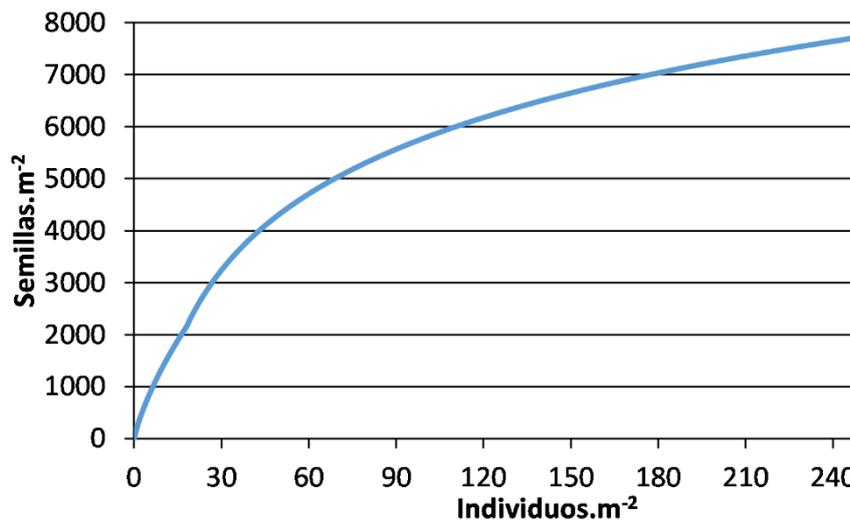


Figura 4.2. Producción de semillas (semillas.m²) en función de la densidad de individuos de EPHDV (Individuos.m²) (Ecuación 4.4).

4.2.9. Parámetros económicos, ambientales y de control

Los parámetros económicos utilizados en la simulación (Tabla 4.3) se obtuvieron de fuentes actualizadas, específicas para la región bajo estudio (Anón, 2022a; b). Las acciones de control utilizadas se presentan en Tabla 4.4 junto a los parámetros económicos y ambientales asociados. Los valores de EIQ se obtuvieron de Eshenaur et al. (2023) y el valor de EIQ por hectárea fue calculado según Kovach et al. (1992) (Tabla 4.4). Los parámetros para el cálculo de los índices P y T (T_{mam} , T_{ins} , T_f y T_{imp}) se calcularon a partir de los valores de toxicidad obtenidos de Pesticide Properties DataBase (2022).

Tabla 4.3. Parámetros económicos utilizados en el sistema EPHDV-Soja.

Descripción del parámetro	Densidad estándar	Densidad alta	Fuente
Costo de siembra (semilla + siembra + fertilizante + inoculante)	164 US\$.ha ⁻¹	177 US\$.ha ⁻¹	
Precio de venta de granos	370 US\$.tn ⁻¹		(Anón, 2022a)
Costo de cosecha	72 US\$.ha ⁻¹		
Gastos comercialización	15 % del ingreso bruto		
Tasa de descuento (td)	15 %		(Anón, 2022b)

Tabla 4.4. Detalle de acciones de control utilizadas en el sistema EPHDV-Soja.

Acción de control	Herbicidas			Labranzas		Referencias
	Total (G3)	Total + residual (G + imz)	Total + no residual (G + flp)	Arado de discos (AraD)	Rastra de discos (RasD)	
Formulación y Dosis	glifosato (LS 40,5%): 3 L.ha ⁻¹	glifosato (SL 66,2%): + imazetapir (SL 10%): 2 + 1 L.ha ⁻¹	glifosato (LS 66,2%)+ fluroxipir (EC 48%): 2 + 0,4 L.ha ⁻¹	-	-	(Juan et al., 2006; Istilart et al., 2014; Núñez-Fré et al., 2015; Núñez-Fré, 2019)
Período de acción residual [días]	-	30	-	-	-	
Efecto residual (Cr _{01,t})	-	1	-	-	-	
Tasa de mortalidad para	s = 1 (Ct ₁) s = 2 (Ct ₂) s = 3 (Ct ₃) s = 4 (Ct ₄)	0,99 0,85 0,80 0,30	0,99 0,85 0,80 0,29	0,99 0,85 0,80 0,30	0,99 0,99 0,99 0,99	
Herbicida + costo de aplicación [US\$.ha ⁻¹]	52,00	40,00	46,00	40,00	37,00	(Anón, 2022b; a)
EIQ	15,33	15,33 y 22,30	15,33 y 36,67	-	-	(Eshenaur et al., 2023)
EIQ de campo [EIQ.ha ⁻¹]	18,63	22,25	19,45	-	-	
Índice T	Mín(T _{imp})	-	-	-	0	(Ferraro et al., 2003)
	Máx(T _{imp})	-	-	-	1,84	
	T _{imp}	-	-	-	0,86	
	Mín(T _{ins})	-	0	-	-	
	Mín(T _{mam})	-	0	-	-	
	Mín(T _{fish})	-	0	-	-	
Índice P	Máx(T _{ins})	-	12084,181	-	-	SENASA ⁴
	Máx(T _{mam})	-	4,129	-	-	
	Máx(T _{fish})	-	171814,50	-	-	
	T _{mam}	0,607	0,02	0,76	-	(University of Hertfordshire, 2022)
	T _{ins}	12,15	1,00	14,31	-	
	T _f	12,15	0,294	26,67	-	

⁴ En el Registro Nacional de Terapéutica Vegetal, a marzo 2022, y utilizado en alguno de los siguientes cultivos extensivos: Trigo, Cebada, Centeno, Avena, Maíz, Girasol, Soja y Algodón. <https://aps2.senasa.gov.ar/vademecum/app/publico/formulados>

4.3. Calibración y validación

4.3.1. Estimación del rendimiento esperado

Para la estimación del rendimiento esperado (Yld) se ajustaron los parámetros a y k de la Ecuación 2.10. En este capítulo los parámetros fueron calculados minimizando la diferencia (mínimos cuadrados) entre las predicciones y los datos experimentales extraídos de publicaciones del grupo de Terapéutica Vegetal de la UNICEN (Juan y Saint-André, 1997; Juan et al., 2000, 2002, 2003). Los experimentos a campo fueron realizados por dicho grupo de investigación en el partido Azul ($36^{\circ}47'00''S$ $59^{\circ}51'00''O$), utilizando distintos tipos de manejo cultural (variedades, momentos de siembra, distanciamiento entre hileras y densidades de siembra de soja), ensayos de control químico, control mecánico, competencia con EPHDV e información sobre el estado fenológico y momento de control. Los ensayos reportados por Juan et al. (2000, 2002, 2003) se repitieron durante dos campañas (dos ciclos del cultivo en competencia con la maleza). A fin de ajustar la ecuación de rendimiento se utilizó el valor promedio obtenido de los datos de ambas campañas. También se utilizó la información extraída de Juan y Saint-André (1997) generada a partir de ensayos de competencia y manejo durante la campaña agrícola (1995/96). En el Anexo II se detalla un cuadro ejemplificando la información utilizada para simular los ensayos de campo.

4.3.2. Metodología, calibración y validación

De los trabajos citados previamente se extrajeron un total de 37 datos de rendimiento (N=37) que fueron divididos al azar, distribuyendo 70% para la calibración (N=26) y el 30% restante para la validación (N=11) del modelo. Para la calibración, se obtuvieron los valores de a y k (Ecuación 2.10) que minimizan la raíz cuadrada media del error (RMSE, por sus siglas en inglés) entre los Yld observados y los simulados. Los

parámetros ajustados fueron $a=0$ y $k=0,1$ (Figura 4.3 a). El modelo fue validado obteniéndose un $RMSE=0,085$ (Figura 4.2 b).

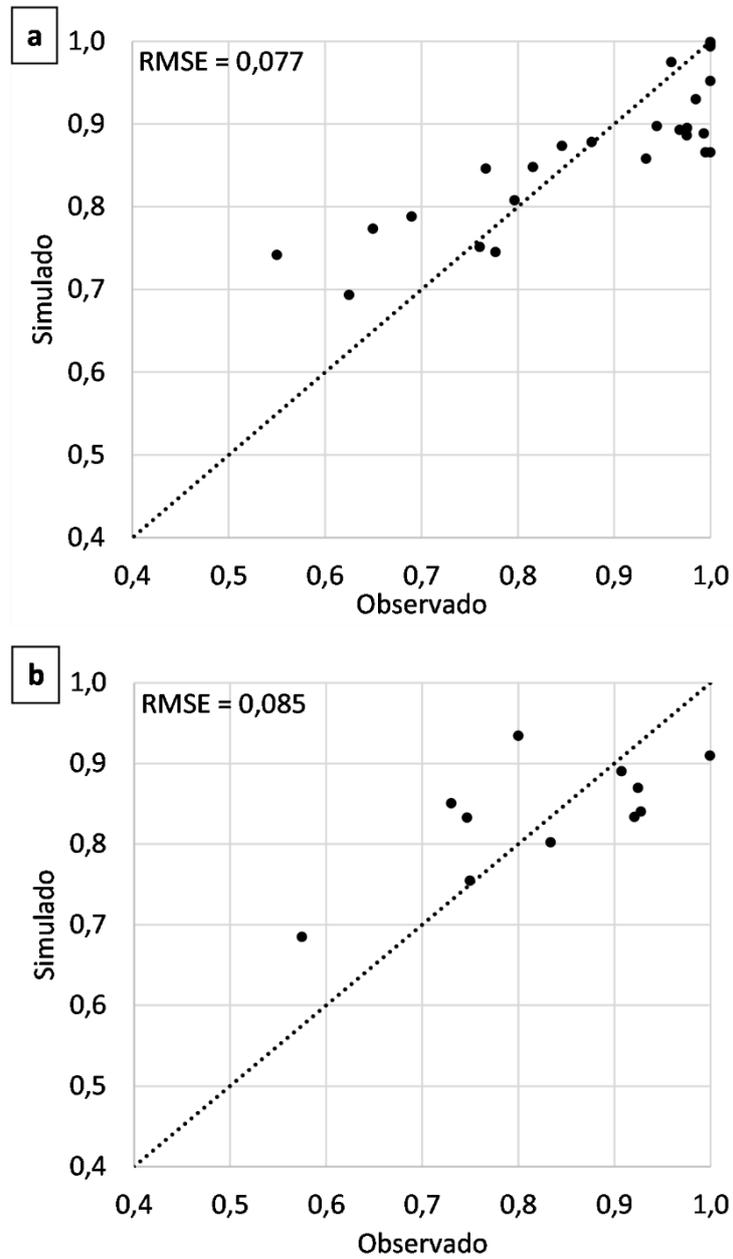


Figura 4.3. Calibración (a) y validación (b) de la función de rendimiento esperado (Yld).

4.4. Resultados

4.4.1. Ajuste de un modelo de predicción de emergencia

En la Figura 4.4 se puede apreciar el ajuste del modelo de emergencia (línea sólida) sobre los datos observados (línea de trazos).

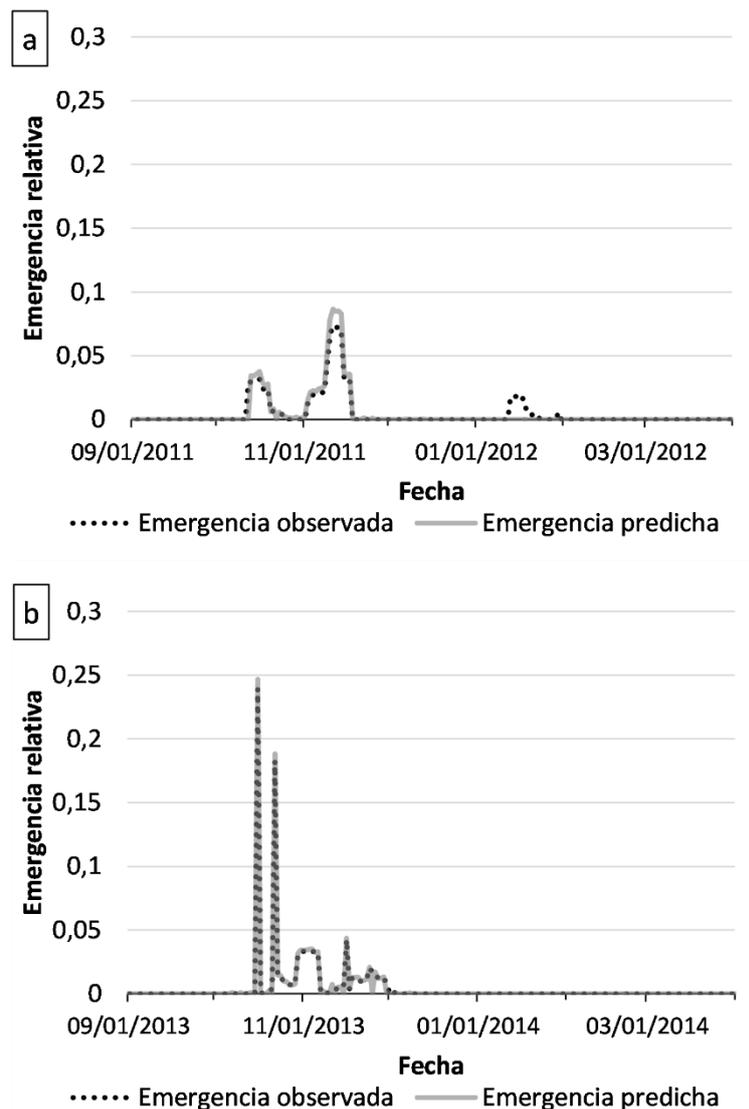
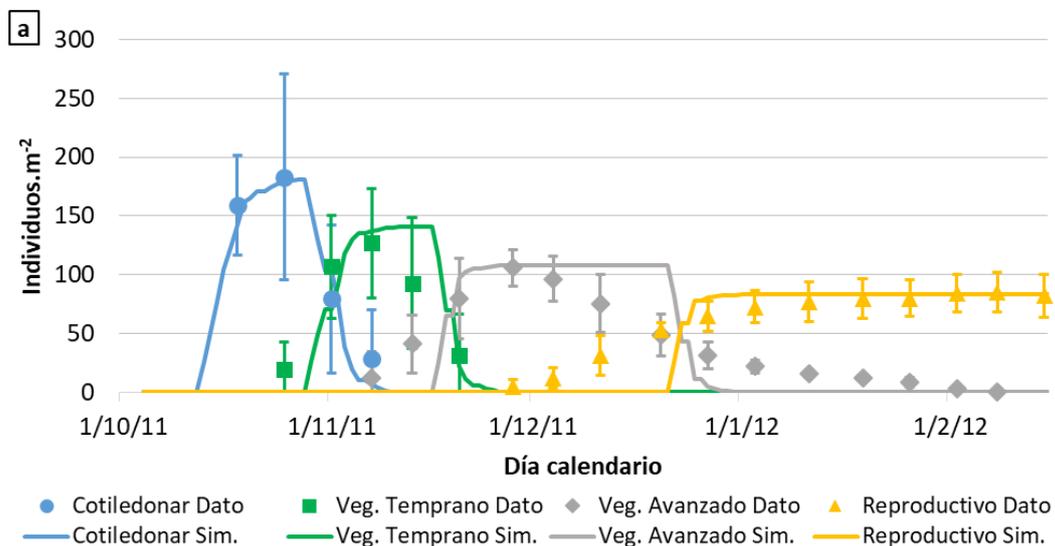


Figura 4.4. Emergencia diaria predicha vs observada (RMSE=0,05). Sobre la izquierda se encuentra al período 2011-2012 (Sub-figura a) y sobre la derecha el período 2013-2014 (Sub-figura b). Las figuras muestran la emergencia observada a campo (línea de trazos) vs la predicha (línea sólida).

Mediante la inspección detallada de la Figura 4.4 a, correspondiente a la campaña 2011-2012, pueden observarse 3 cohortes de emergencia bien diferenciadas, la última de la cuales no es capturada por el modelo de emergencia. Cabe destacar que ninguno de los individuos emergidos en esta cohorte lograron alcanzar el estado reproductivo, debido a condiciones ambientales desfavorables (estrés térmico e hídrico) (Núñez-Fré, 2019). Más allá de esto, se infiere que esa cohorte tardía tendría un impacto relativo menor sobre la competencia con el cultivo de soja. Para el ciclo 2013-2014, la emergencia es correctamente representada por el modelo (Figura 4.4 b)

4.4.2. Dinámica poblacional

En la presente sección se mostrará la capacidad del modelo para simular la dinámica poblacional de EPHDV. En las Figuras 4.5 y 4.6 se presenta la dinámica poblacional simulada (líneas enteras) en comparación con la observada a campo (puntos) para las dos temporadas analizadas. La dinámica de la maleza se presenta separada en dos y tres cohortes de emergencia, respectivamente.



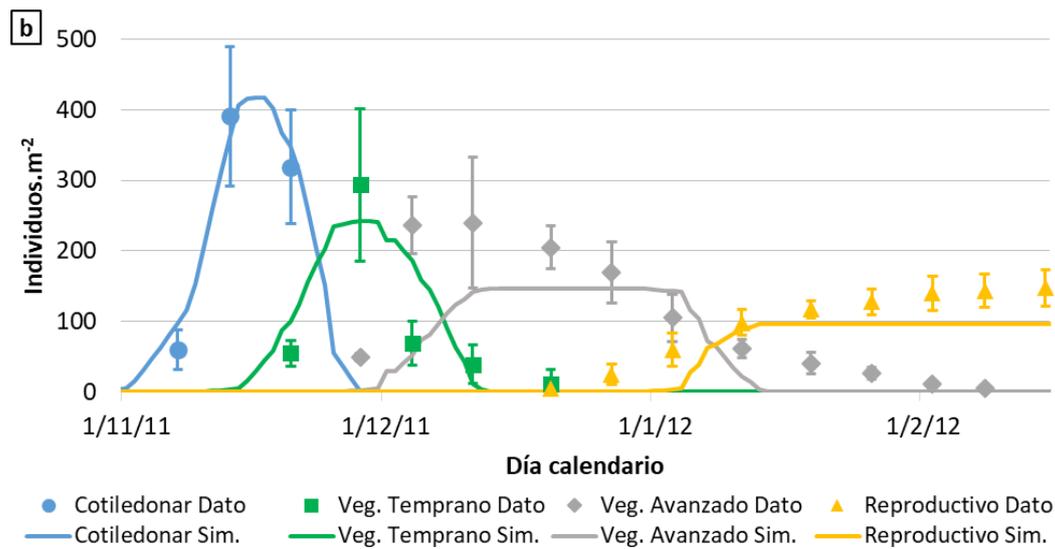


Figura 4.5. Dinámica poblacional de las principales cohortes de EPHDV durante la campaña 2011/2012. Datos observados a campo (puntos) vs simulación (líneas continuas con diferente color en función del estado fenológico correspondiente). Sub-figuras (a) y (b) para la 1° y 2° cohorte, respectivamente. Barras indican desvíos estándar.

En la Figura 4.5 (campaña 2011/2012), la simulación proporciona una aproximación a la dinámica poblacional observada a campo, con algunas desviaciones que se incrementan en los momentos de transición entre estados fenológicos y disminuyen en los momentos de uniformidad fenológica. La tercera cohorte de la campaña 2011/2012 no se presenta debido a que no fue captada por el modelo predictivo de emergencia. Lo anterior se amortigua con la observación experimental de que dichas plántulas no lograron completar su ciclo de vida por la ocurrencia de estrés térmico e hídrico (Nuñez-Fré 2019).

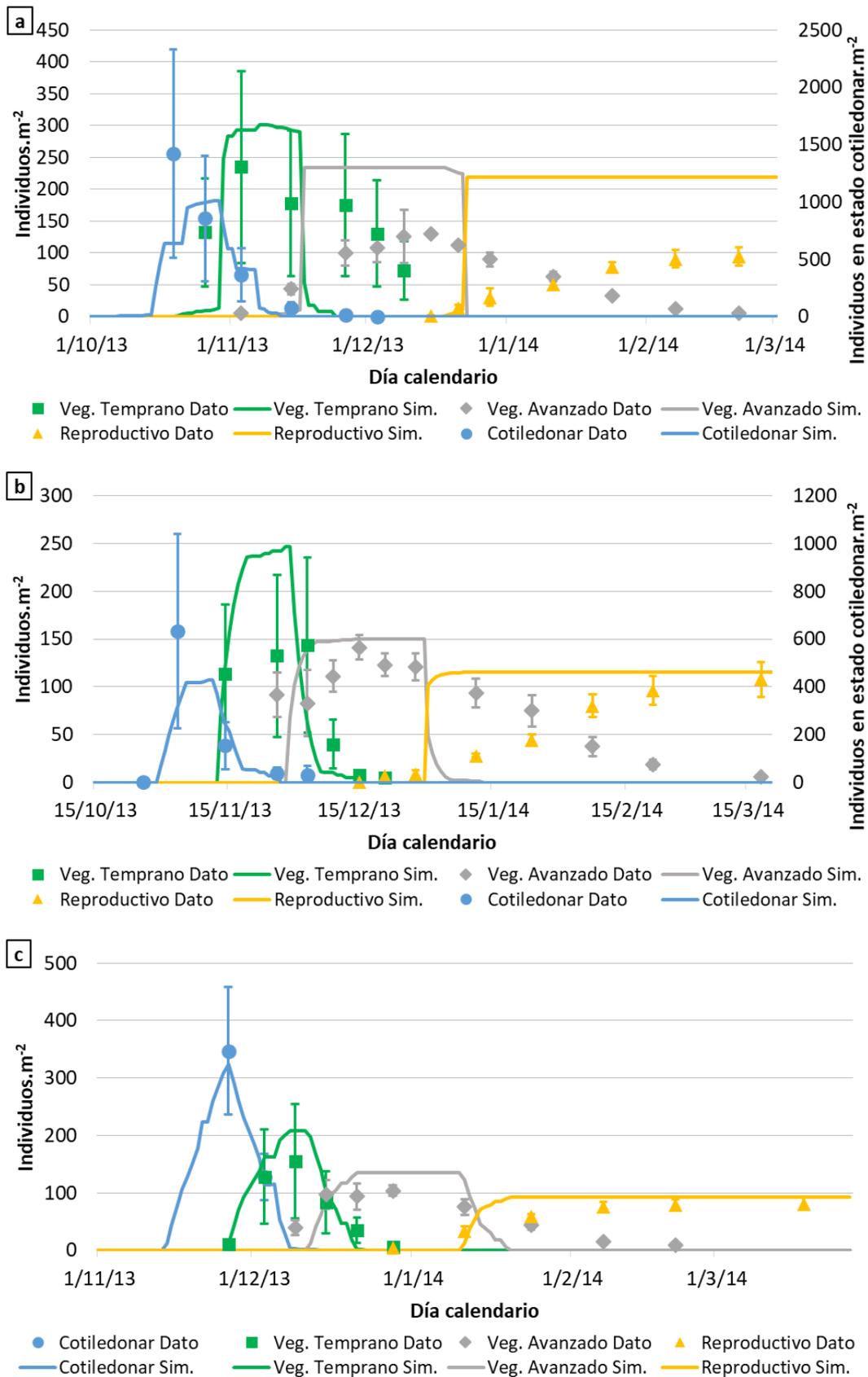


Figura 4.6. Dinámica poblacional de las principales cohortes de EPHDV durante la campaña 2013/2014. Datos observados a campo (puntos) vs simulación (líneas continuas con diferente

color en función del estado fenológico correspondiente). Sub-figuras (a), (b) y (c) para la 1°, 2° y 3° cohortes respectivamente. Barras indican desvíos estándar. **En las sub-figuras (a) y (b) se agregó el eje Y secundario para mejorar la visualización de los resultados.**

En la Figura 4.6 a,b (campana 2013/14), se puede observar que la simulación posee una menor dispersión temporal en los estados de 2-4 hojas y 6 hojas a ramificación, lo que genera densidades mayores pero de menor duración que las observadas a campo. Esta diferencia se puede atribuir al hecho de que se simula con un único valor de tiempo-térmico para cada estado fenológico (Th_s). El requerimiento de Th_s se ajustó minimizando la diferencia entre la simulación y los datos observados a campo (Tabla 4.1). Cabe destacar que la simplificación sobre el valor de Th_s es útil para generar modelos sencillos y de fácil utilización.

En todos los casos se aprecia una reducción en las densidades a medida que los individuos avanzan en los estados fenológicos. Esto se debe a la función de competencia intraespecífica explicada en la sección 4.2.6. (Ecuación 4.1). En general se logró un buen ajuste de la función, aproximando a los datos experimentales. Las principales desviaciones se observan en el pasaje entre cohortes, para las cuales el modelo no pudo reaccionar de forma adecuada. Esto se tradujo en una sobrestimación en la densidad final de individuos al estado reproductivo (Figura 4.6a).

4.4.3. Competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza

Se presentan las curvas de competencia del cultivo ($Ciect_t$) en función de la acumulación de tiempo térmico (D_t) (Figura 4.7). Se destacan las diferencias en longitud de ciclo para soja de siembra tardía y estándar, siendo el ciclo sensiblemente más corto para la primera. En todos los casos, el valor máximo de competencia ($Ciect = 1$) depende de la densidad de siembra y el distanciamiento entre hileras, variables que también inciden en las pendientes de las curvas hacia el inicio y final del ciclo del cultivo.

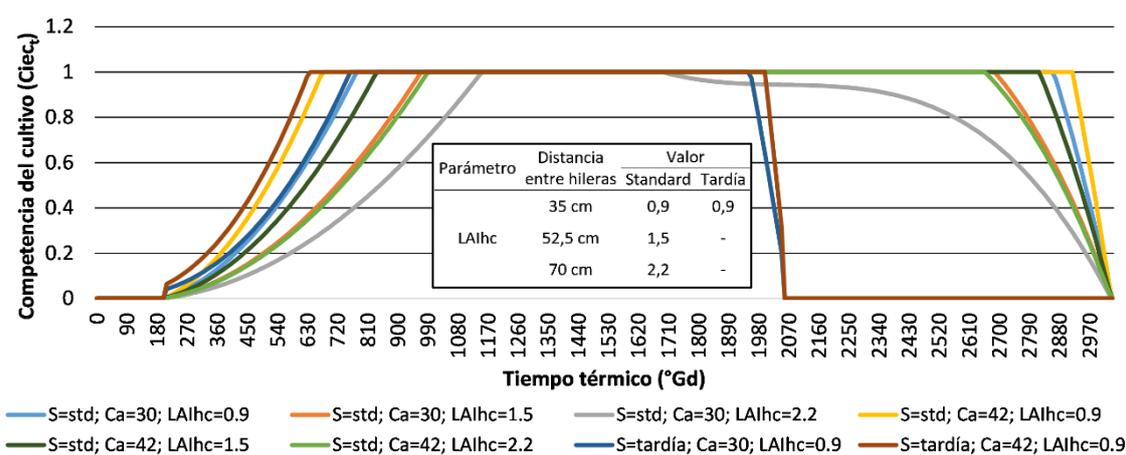


Figura 4.7. Índice de competencia interespecífica del cultivo de soja ($Ciec_t$) en función de la acumulación de tiempo térmico (D_t). S= momento de siembra, std= estándar, tardía= siembra tardía; Ca=densidad de siembra; LAIhc= valor de LAI que representa una situación de alta competencia (Tabla 4.2)

4.4.4. Casos de estudio

Se presentan dos casos de estudio anuales con 2 sub-casos comparativos en cada uno (horizonte operativo) y un caso de estudio multianual (horizonte táctico-estratégico).

Casos anuales (horizonte operativo)

En la Tabla 4.5 se detallan los casos y sub-casos analizados. El resultado de las simulaciones se reporta en la Tabla 4.6.

Tabla 4.5. Parámetros de entrada para los casos anuales I y II (sub-casos A y B). Caso I: manejo mecánico y cultural. Caso II: control químico y manejo cultural.

Descripción	Caso I		Caso II		Unidades
	Sub-caso	Sub-caso	Sub-caso	Sub-caso	
	A	B	A	B	
Semillas quiescentes (Maleza)	1400		1400		semillas.m ⁻²
Dato de emergencia	Observado		Observado		-
Densidad de siembra	Alta (42)	Estándar (30)	42	30	plantas.m ⁻²
Distancia entre hileras	35		35	70	cm
Fecha de siembra	7/11/13	20/12/13	7/11/13		
Fecha de control durante barbecho	6/11/13	19/12/13	28/10/13		
Acción de control durante barbecho	Arado de discos		Mezcla de herbicidas total + residual (G+Imz)		-

Tabla 4.6. Variables de salida correspondientes a los casos anuales I y II (sub-casos A y B). Caso I: manejo mecánico y cultural. Caso II: control químico y manejo cultural.

Variable	Caso I		Caso II		Unidades
	Sub-caso	Sub-caso	Sub-caso	Sub-caso	
	A	B	A	B	
Impacto ambiental	EIQ	0	22,25		-
	Índice P	0	0,002		-
	Índice T	0,31	0		-
Producción total de semillas de EPHDV	5388	598	2237	3667	semillas.m ⁻²
Competencia interespecífica EPHDV-Soja	230,06	7,97	35,58	65,41	-
Rendimiento esperado del cultivo	78,77	98,45	95,34	89,26	%
Margen Bruto Anual	455	654	651	607	US\$.ha ⁻¹

Caso I. Manejo combinado (Control mecánico + medidas culturales).

Se realizaron simulaciones utilizando medidas de manejo cultural combinadas con labranzas, omitiendo el control químico. Específicamente, se representa la aplicación de una acción de control mecánico durante el barbecho, combinada con medidas culturales (distintas densidades de siembra, fechas de siembra y distanciamiento entre hileras del cultivo de soja). Las medidas de manejo utilizadas para cada sub-caso se encuentran detalladas en la Tabla 4.5. El resultado de las simulaciones se reporta en la Tabla 4.6 y la Figura 4.8.

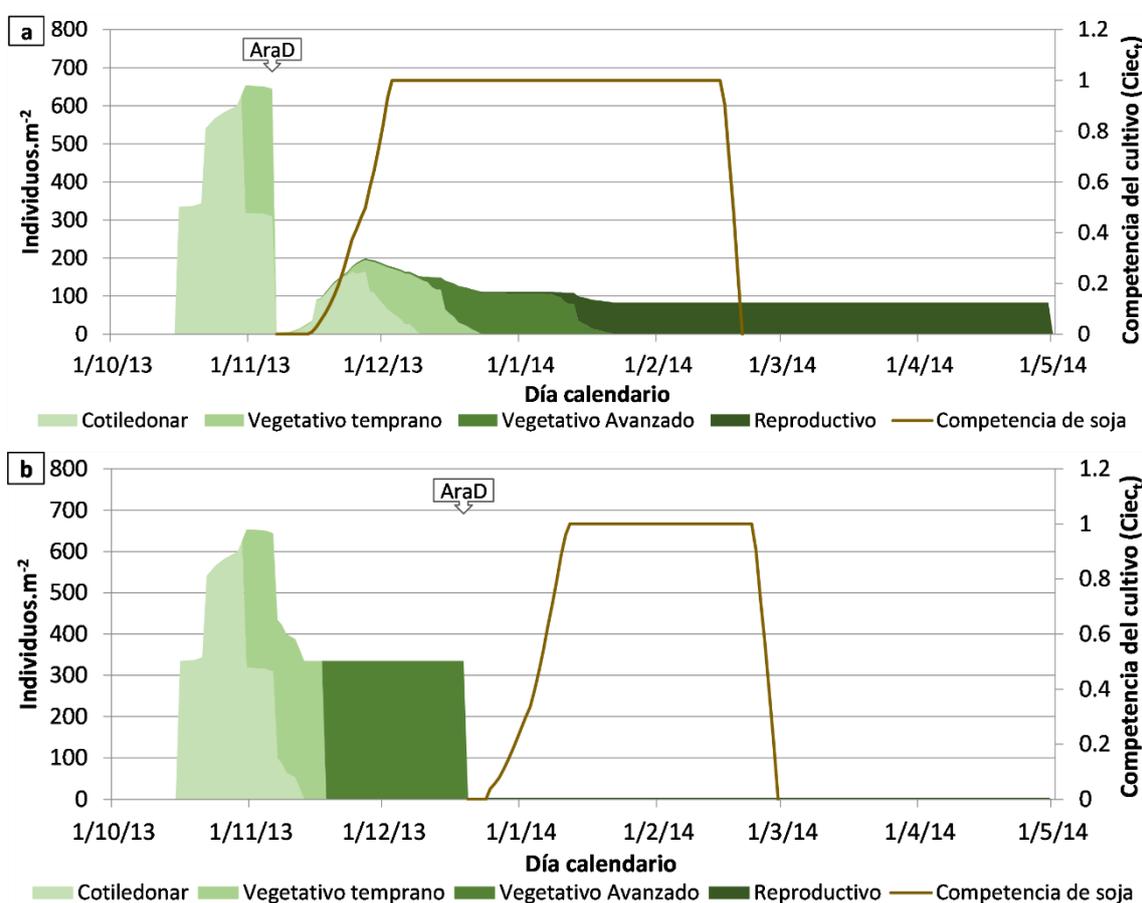


Figura 4.8. Dinámica poblacional de EPHDV mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una alta infestación de semillas (1400 semillas quiescentes.m⁻²). Las flechas indican momento y acción de control. El efecto del control mecánico fue simulado con un arado de discos. El cultivo de soja, con sus diferentes manejos culturales (sub-caso A y B), se representa a través del índice de competencia del cultivo. sub-caso A (a) y sub-caso B (b).

En el sub-caso A se simuló una acción de control mecánico el día previo a la siembra del cultivo. Se consideró una alta densidad de siembra y una distancia entre hileras de 35 cm. El control mecánico resultó insuficiente para suprimir la mayoría de las nuevas plántulas de EPHDV, las cuales generaron alta competencia con el cultivo alcanzando una densidad final de 80 individuos.m⁻² al estado reproductivo (Figura 4.8a). En el *sub-caso B* (Figura 4.8b), el principal elemento de manejo cultural introducido fue el atraso en la fecha de siembra del cultivo de soja para evitar la competencia con las cohortes de diciembre, las cuales ejercieron un fuerte efecto competitivo sobre el cultivo (ver sub-caso A). Al igual que en sub-caso A, el barbecho mecánico fue realizado el día previo a la siembra controlando así a la mayoría de los individuos emergidos hasta esa fecha.

Los resultados finales de la simulación (Tabla 4.6) evidencian las ventajas del manejo aplicado en el sub-caso B se manifiestan claramente en los indicadores económicos (Tabla 4.6). Ambos sub-casos poseen exactamente los mismos valores absolutos de impacto ambiental dado que solo se diferencian en las medidas culturales. El efecto negativo de la labranza queda definido a partir del valor del índice T. En este caso el impacto ambiental por control químico es nulo (EIQ y P) debido a que no se aplicaron herbicidas.

Caso II. Manejo combinado (medidas culturales + control químico)

El objetivo principal de este caso es ilustrar tanto el efecto de la aplicación de medidas culturales como el impacto de tratamientos de control químico sobre la dinámica poblacional de la maleza (Figura 4.9). Se simula la aplicación en barbecho de un herbicida total (glifosato 66,2%, 2 L.ha⁻¹) en mezcla con un herbicida selectivo de acción residual (imazetapir 10%, 1 L.ha⁻¹), 10 días antes de la siembra del cultivo de soja.

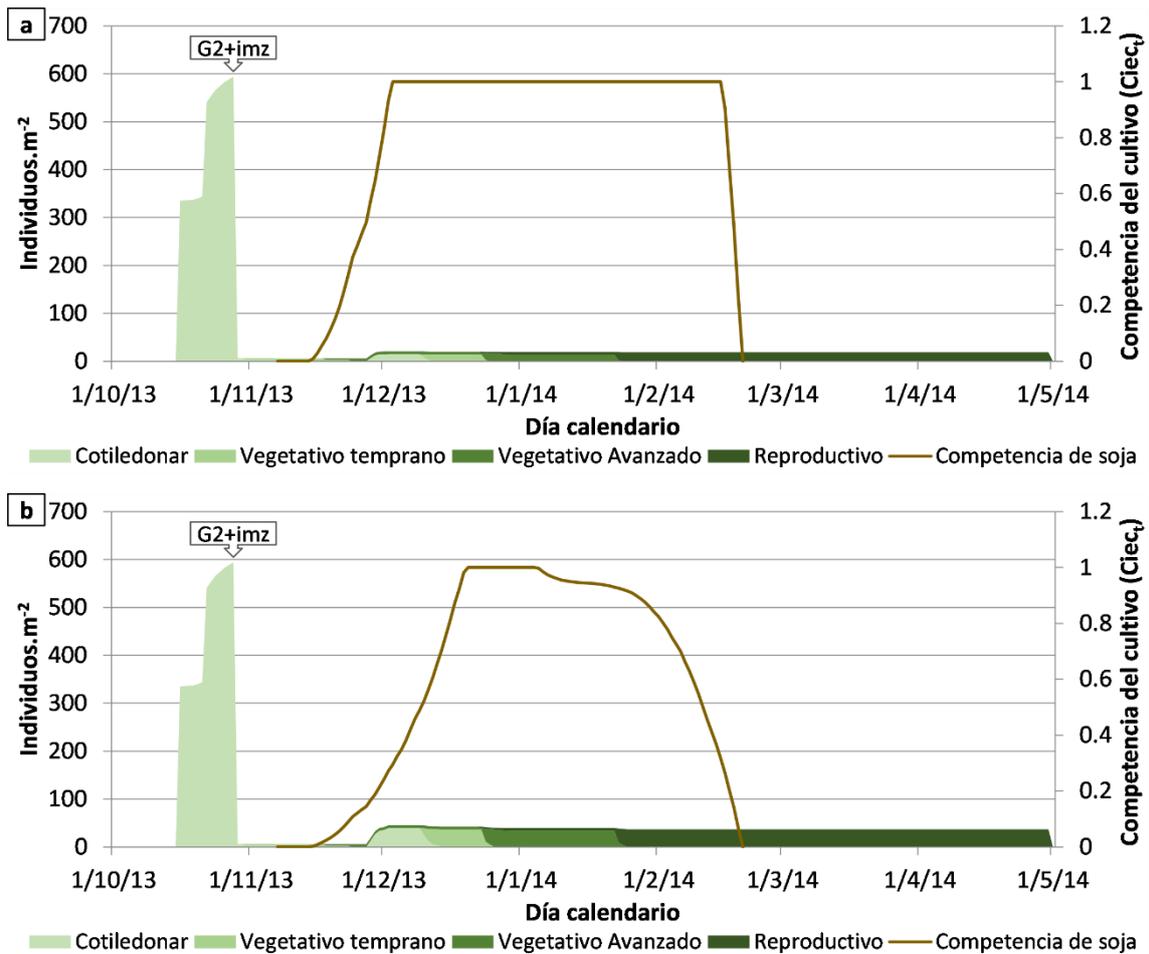


Figura 4.9. Dinámica poblacional de EPHDV mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una alta infestación de semillas ($1400 \text{ semillas quiescentes.m}^{-2}$). Las flechas indican momento y acción de control. Se simula el efecto del control químico con una mezcla de herbicidas de control total + selectivo residual con 30 días de acción (glifosato 66,2%, 2 L.ha^{-1} y imazetapir LS 10%, 1 L.ha^{-1}). El cultivo de soja, con sus diferentes manejos culturales (sub-caso A y B), se representa a través del índice de competencia del cultivo. a) Caso II, sub-caso A y b). Caso II, sub-caso B.

El presente caso también se encuentra dividido en dos sub-casos (A y B) diferenciados en las medidas de manejo cultural aplicadas (densidad de siembra y distanciamiento entre hileras). Al igual que en el ejemplo anterior, se presentan dos flujos de emergencia de gran magnitud ubicados a mediados de octubre. Dichos flujos son controlados con la aplicación de la mezcla de herbicidas a fines de octubre. El efecto residual del imazetapir se extiende durante gran parte del mes de noviembre, evitando el reclutamiento de $165 \text{ individuos.m}^{-2}$ (Figuras 4.8a y 4.9). Luego de finalizado el

período de residualidad se observan nuevos flujos sobre finales de noviembre. En el último flujo de emergencia se incorporaron 15 individuos.m⁻² para el sub-caso A y 39 individuos.m⁻² para el sub-caso B. La mayor cantidad de individuos en el sub-caso B se corresponde a la menor competencia interespecífica del cultivo (C_{ict}), producto de una menor densidad de siembra y un mayor distanciamiento entre hileras.

Los resultados finales de la simulación favorecieron al sub-caso A, tanto en los indicadores económicos como agronómicos, debido a la aplicación de medidas de manejo cultural (Tabla 4.6). Ambos sub-casos poseen exactamente los mismos valores de los indicadores de impacto ambiental dado que solo difieren en las medidas culturales. Se observa un impacto ambiental negativo por aplicación de herbicidas (EIQ y P) mientras que el indicador de impacto por labranzas (T) es nulo (Tabla 4.6).

Caso III: Multianual (horizonte táctico-estratégico)

En este caso de estudio se evaluó el desempeño del modelo dentro de un horizonte de mediano a largo plazo. Para poder generar una simulación multianual y debido a la ausencia de información específica sobre la maleza, fue necesario aproximar criteriosamente varios parámetros relacionados a la dinámica del banco de semillas de EPHDV. A partir de la literatura (Bowes y Thomas, 1978; Núñez-Fré et al., 2014; Asgarpour et al., 2020) (Tabla 4.2) se lograron inferir valores aproximados de longevidad, tasa de dispersión, y dormición del banco de semillas.

El horizonte simulado consistió en cinco campañas agrícolas consecutivas (1996 al 2001). Se simularon distintas estrategias de manejo en cada ciclo, pero se mantuvieron constantes la densidad de siembra y la distancia entre hileras. Los parámetros de entrada y salida se detallan en las Tablas 4.7 y 4.8. En la Figura 4.10 pueden observarse los resultados de la simulación.

Tabla 4.7. Parámetros de entrada para el caso multianual.

Descripción		Parámetros de entrada					Unidades
Semillas quiescentes (Maleza)	2800	-	-	-	-	-	semillas.m ⁻²
Dato de emergencia						Simulado	-
Densidad de siembra						Alta (42)	plantas.m ⁻²
Distancia entre hileras						35	cm
Fecha de siembra	10/11/96	10/11/97	10/11/98	10/11/99	10/11/00		
Fecha de control durante barbecho	11/9/96	11/9/97	11/9/98	11/8/99	11/8/00		
Acción de control durante barbecho	Rastra de discos (RasD)	Mezcla de herbicidas Total + residual (G+Imz)	Arado de discos (AraD)	Total (G3)	Mezcla de herbicidas Total + no residual (G+Flp)		-

Tabla 4.8. Variables de salida del modelo de simulación correspondientes al caso multianual.

Variable		1996	1997	1998	1999	2000	Unidades
Impacto ambiental	EIQ	0	22,25	0	18,62	27,33	--
	Índice P	0	0,002	0	0,075	0,093	--
	Índice T	0,28	0	0,31	0	0	--
Producción total de semillas de EPHDV		2271	3196	523	1040	1371	semillas.m ⁻²
Competencia interespecífica EPHDV-Soja		51	80	8	18	26	--
Rendimiento esperado del cultivo		93,5	90,4	98,9	97,6	96,5	%
Margen Bruto Anual		596	564	644	620	616	US\$.ha ⁻¹
Valor actual				3579			US\$.ha ⁻¹

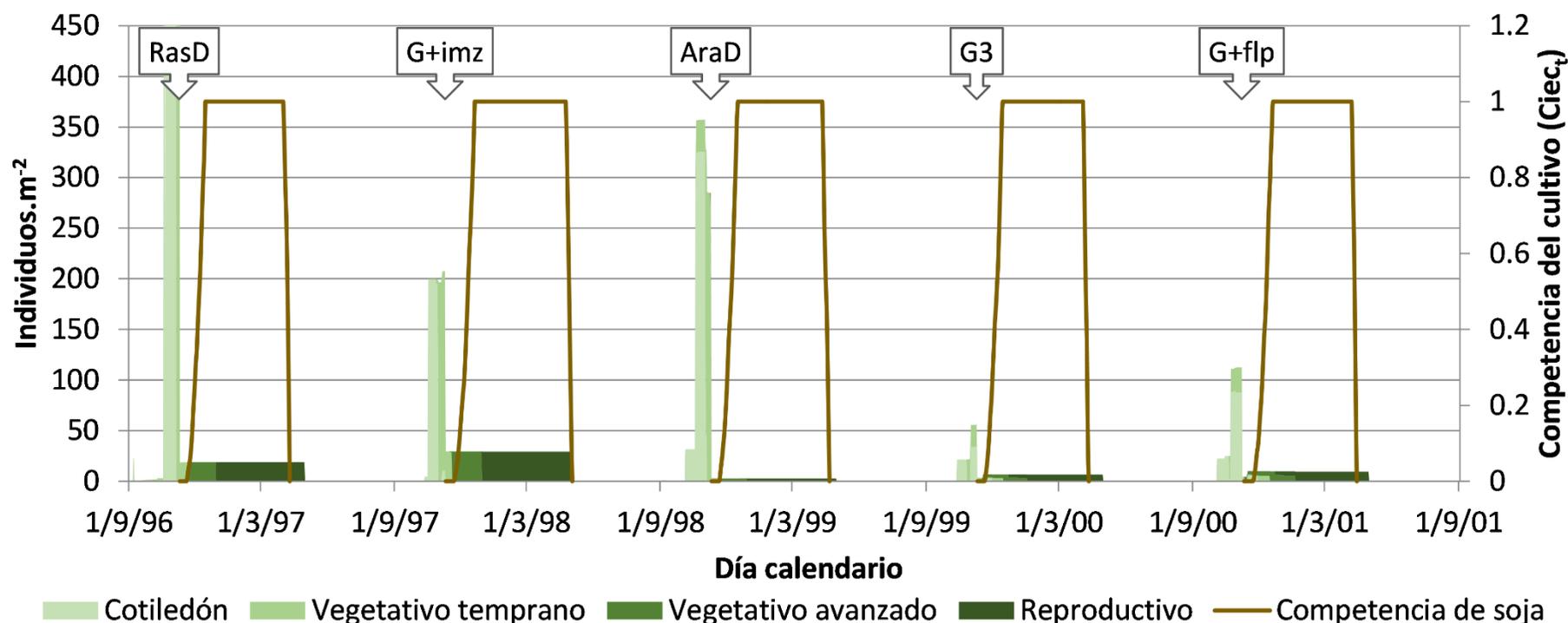


Figura 4.10. Dinámica poblacional de EPHDV mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una muy alta infestación de semillas (2800 semillas quiescentes.m⁻²). Las flechas indican fechas y acciones de control. Se simula el efecto de los siguientes métodos de control: RasD (Rastra de discos); G+imz (glifosato (66,2%): 2 L.ha⁻¹ + imazetapir (10%): SL, 1 L.ha⁻¹); AraD (Arado de discos); G3 (glifosato (40,5%): LS, 3 L.ha⁻¹); G+Flp (glifosato (66,2%): 2 L.ha⁻¹ + fluroxipir (48%): EC, 0,4 L.ha⁻¹). El cultivo de soja se representa a través del índice de competencia del cultivo. El eje Y fue escalado a 450 individuos.m⁻² para mejorar la visualización de los resultados.

El manejo cultural se basó en la siembra de soja a alta densidad y una distancia entre hileras reducida, causando una rápida cobertura del entresurco, lo que resulta en una competencia temprana sobre la maleza a expensas de un mayor costo de siembra (Tabla 4.3 y Figura 4.10).

Los controles se realizaron en barbecho, y se varió entre controles químicos y mecánicos de distinto tipo (Tabla 4.7).

Analizando la dinámica anual, se puede observar que la primera cohorte de cada campaña fue controlada por medio de la aplicación previa a la siembra, con algunos individuos escapando al control y compitiendo con el cultivo. La segunda cohorte también generó competencia en algún período, mientras que la tercera (entre diciembre y enero), pudo ser suprimida efectivamente por la competencia interespecífica del cultivo de soja, la cual se encontraba reforzada por las medidas de manejo cultural.

En general, las medidas de manejo aplicadas disminuyeron drásticamente la infestación inicial. Se obtuvo una alta competencia y producción de semillas durante los ciclos de cultivo 1996 y 1997, con una sensible disminución en las campañas subsiguientes (Tabla 4.8). El rendimiento esperado del cultivo se vio parcialmente afectado en los primeros dos ciclos sin llegar a generar una pérdida considerable. En las campañas siguientes el cultivo promedió un 97% del rendimiento potencial (Tabla 4.8).

Los índices ambientales marcaron diferencias según el tipo de control utilizado en cada campaña. En particular, para el año 2000, la mezcla de herbicidas no residuales (G+Flp) produjo un impacto ambiental negativo (Tabla 4.8). El margen bruto se mantuvo entre 564 y 644 US\$.ha⁻¹, y el valor actual alcanzó 3579 US\$.ha⁻¹.

4.5. Discusión y conclusión

La adaptación del modelo de base al sistema *E. davidii*-Soja permitió la incorporación de los siguientes aportes originales: (i) desarrollo de un modelo de predicción de emergencia específico para EPHDV; (ii) mejora de la ecuación de competencia intraespecífica; (iii) ajuste de curvas de competencia interespecífica del cultivo sobre la maleza y (iv) ajuste de la ecuación para simular la producción de semillas de EPHDV.

A continuación, se discuten las adaptaciones:

- *Modelo de predicción de emergencia*: A diferencia del capítulo anterior, donde se contaba con un modelo de emergencia previamente desarrollado (Chantre et al., 2018), en el presente capítulo, se desarrolló un modelo propio. Consideramos que, aunque ajustado con un número pequeño de observaciones, el modelo propuesto constituye un buen punto de partida para estimar la emergencia en simulaciones de dinámica poblacional, en tanto no se cuente con nueva información de emergencia a campo que permita mejorar el ajuste y validar sus predicciones.
- *Ecuación de competencia intraespecífica*: La ecuación empleada en este capítulo se modificó con respecto a la presentada en el Capítulo 2. Pese a la limitada disponibilidad de información sobre estos procesos, la ecuación propuesta permite una mejor adaptación a la dinámica poblacional de EPHDV observada experimentalmente por Núñez-Fré (2019).
- *Competencia interespecífica cultivo-maleza*: En este capítulo se siguió la metodología utilizada en el capítulo anterior, pero se realizaron adaptaciones necesarias para el agrosistema estudiado. Se incorporaron los efectos de fecha de siembra y distanciamiento entre hileras, sobre la competencia interespecífica del cultivo de soja. Los resultados finales concuerdan con los reportados en otros

trabajos (Bagg et al., 2002; Confalone et al., 2016; Meira et al., 2019; Núñez-Fré, 2019).

- *Producción de semillas:* A diferencia de lo propuesto para AVEFA en el capítulo anterior, en este caso se ajustó una ecuación con una única cohorte reproductiva. Las diferencias reportadas en la fecundidad y producción máxima de semillas, fueron insuficientes para justificar la clasificación de los individuos en más de una cohorte reproductiva bajo condiciones de competencia con cultivos primavera-estivaes (Núñez-Fré, 2019).

Como conclusión, los resultados simulados mostraron que, en condiciones de alta infestación de la maleza, es necesario combinar: (i) estimaciones de flujos de emergencia; (ii) métodos de manejo cultural, como siembras tardías, altas densidades de siembra y/o reducción de la distancia entre hileras; (iii) acciones de control químico, especialmente la mezcla de herbicidas no selectivos con herbicidas que posean acción residual; (iv) control mecánico de malezas, por su alta eficiencia de control sobre EPHDV en estados avanzados de desarrollo. Al realizar estas combinaciones, se podrían obtener resultados agronómicos satisfactorios, sin generar un gran impacto negativo en forma de externalidades asociadas a los controles químicos y mecánicos.

Por otro lado, el proceso de adaptación del modelo base permitió identificar una variable crítica, el banco de semillas, como una limitante importante para el desarrollo de modelos de simulación a largo plazo. La información sobre la dinámica del banco de semillas de EPHDV es muy escasa y la información sobre especies emparentadas es insuficiente y carece de relación con el agrosistema bajo estudio. A pesar de esto, en líneas generales se podría decir que el proceso de adaptación del modelo de base fue exitoso, demostrando una adecuada versatilidad y factibilidad de adaptación a sistemas distintos al original.

CAPÍTULO 5

Discusión, Conclusiones y Trabajo Futuro

5.1 Discusión general

A través del modelo desarrollado en esta tesis se lograron representar los procesos demográficos de la maleza y su interacción con la dinámica de crecimiento y desarrollo del cultivo. Por medio de diferentes simulaciones, fue posible comparar distintas estrategias de manejo de la maleza y cuantificar su efecto sobre las variables agronómicas, económicas y ambientales más importantes. Los procesos, interacciones y componentes más relevantes del modelo se detallan a continuación:

- *Discretización del horizonte de planificación:* las variables de estado pueden ser calculadas de forma anual (Burns et al., 2018; Torra y Monjardino, 2020; D'amico et al., 2021), en periodos de distinta duración, en meses o inclusive en días (Colbach et al., 2014). En este trabajo, todas las variables de estado fueron calculadas con un paso diario. Este nivel de discretización del horizonte permite una investigación más detallada de los escenarios de caso. En particular posibilita: (i) la incorporación del efecto de las variables meteorológicas sobre el cultivo y la maleza, (ii) la adaptación a la frecuencia típica de generación y recolección de información agronómica, (iii) una simulación más detallada de las medidas de control. Colbach (2020) menciona la importancia de la discretización diaria para que los modelos puedan ser coherentes con la escala temporal de las labores agrícolas y la interacción clima-suelo. La actual capacidad de cómputo, incluso a

nivel escritorio, permite desarrollar y ejecutar con relativa facilidad modelos de discretización diaria en plataformas de programación asequibles.

- *Estados fenológicos de la maleza:* el ciclo vital de la maleza se representa a través de las principales variables de estado y procesos demográficos. Específicamente se consideraron los estados fenológicos con diferencias contrastantes en alguna de las variables cuantificadas. A modo de ejemplo: (i) en el primer estado fenológico se consideraron la susceptibilidad a la competencia, la tolerancia a factores ambientales y la sensibilidad a las prácticas de control; (ii) en el estado vegetativo temprano se contemplaron los distintos niveles de competencia intra específica; (iii) en el estado vegetativo avanzado se contemplaron los requisitos para avanzar al estado de floración; y (iv) al estado reproductivo se incluyó el aumento de la tolerancia de las plantas adultas y la pérdida de eficiencia asociada al control con herbicidas selectivos. La representación de los principales estados de crecimiento, combinada con un balance demográfico diario, permite el modelado equilibrado y una novedosa representación gráfica de la dinámica poblacional de la maleza. Si bien esta aproximación permite un nivel de detalle superior a otros trabajos (Torra y Monjardino, 2020), también requiere de una gran cantidad de parámetros que de no encontrarse en la bibliografía deberían estimarse.
- *Producción de semillas de la maleza:* los individuos que alcanzan la etapa de semillazón pueden ser clasificados en diferentes grupos de cohortes reproductivas. A cada grupo se le asigna un valor de fecundidad y producción máxima de semillas en función de las condiciones de crecimiento y desarrollo, como se describe en otros trabajos (Gonzalez-Andujar y Fernandez-Quintanilla, 1991; Pannell et al., 2004; Holst et al., 2007). En este trabajo fue posible simular el impacto del ambiente y las estrategias de manejo sobre cada cohorte diaria de individuos, y su posterior aporte a la producción total de semillas.
- *Banco de semillas de la maleza:* además de los procesos demográficos típicos del banco de semillas (emergencia, predación, mortalidad, dispersión) también se incluyeron la dormición y la longevidad. El modelo simula el impacto de las medidas de MIM, la presencia del cultivo y de la temperatura sobre la dinámica del banco de semillas. Dichos efectos son determinantes en la planificación de

estrategias a mediano y largo plazo como lo demuestran herramientas específicas para dicho fin (Parsons et al., 2009; Borger et al., 2018). Es de mencionar que la falta de información específica sobre la dinámica del banco de semillas de las especies malezas simuladas en el este trabajo hicieron más dificultosas las predicciones de mediano y largo plazo. Por lo tanto, la identificación de zonas de información faltante, es justamente otro de los beneficios de la construcción de este tipo de modelos, permitiendo identificar problemáticas y guiar a la comunidad científica en la formulación de nuevos objetivos para la formulación de proyectos de investigación (Doyle, 1991; Holst, 2020).

- *Competencia maleza-cultivo*: se desarrolló enfoque novedoso para la cuantificación diaria de la competencia interespecífica. Los efectos competitivos diarios de la maleza sobre el cultivo fueron discriminados según el estado fenológico de la maleza y el cultivo, integrándose al final de la temporada agronómica. Dicha metodología representa una forma sencilla y a la vez detallada de incorporar la competencia maleza-cultivo. A través de su implementación se cuantifica el efecto de la competencia de la maleza sobre el cultivo hasta el momento de aplicación de la acción de control. Dicho enfoque es considerablemente distinto a otras aproximaciones que solo cuantifican las malezas sobrevivientes hacia el final del ciclo de cultivo (Berti et al., 1996; Lacoste y Powles, 2014; D'amico et al., 2021).
- *Competencia intraespecífica de la maleza*: es una variable de utilidad para representar escenarios de alta infestación y/o situaciones de control ineficiente de la maleza. A través del enfoque propuesto en esta tesis fue posible simular el efecto competitivo intraespecífico discriminando según el estado fenológico particular de cada cohorte. Esta metodología permite un mayor aprovechamiento de los modelos predictivos de emergencia a campo, simulando el efecto de la competencia según el tamaño y el momento relativo de emergencia de los individuos, factor de gran importancia a la hora de tomar decisiones de manejo (Royo-Esnal et al., 2020). Sin embargo, al igual que en otros trabajos (Westwood et al., 2018), se considera que la simulación de la competencia intraespecífica debería investigarse más a fondo, ya que se requiere información experimental muy específica para un ajuste adecuado de los modelos de simulación.

- *Acciones de control:* el modelo incorpora el efecto de las acciones de control (químicas y mecánicas) a través de las tasas de mortalidad sobre cada uno de los estados fenológicos de la maleza. Esto permite cuantificar el impacto de una determinada acción en función de la susceptibilidad relativa de los individuos al momento de control, incluyendo situaciones de resistencia o tolerancia a herbicidas. El enfoque utilizado en esta tesis considera de forma novedosa el efecto residual de los herbicidas sobre el reclutamiento de nuevos individuos. Además, la metodología de simulación desarrollada presenta un mayor nivel de detalle respecto de trabajos previos (Lacoste y Powles, 2014; Burns et al., 2018; D'amico et al., 2021), aportando una cuantificación desagregada de las consecuencias de las acciones de control en la dinámica poblacional de la maleza.
- *Impacto medioambiental:* el módulo de impacto ambiental permite evaluar el efecto de las medidas de manejo implementadas en cada campaña, a través del EIQ de campo, y de los índices P y T. A través de dicho módulo se logró cuantificar no solo el riesgo de la aplicación de los herbicidas sino también el efecto de las medidas de laboreo mecánico sobre el suelo. Por otro lado, si bien existen visiones críticas del empleo de estos índices como indicadores de impacto (Kniss y Coburn, 2015; MacLaren et al., 2020), consideramos que la incorporación de un módulo de estas características permite, al menos de manera aproximada, integrar de manera explícita algunos indicadores de sostenibilidad ambiental. Esta inclusión representa una mejora con respecto a modelos previamente desarrollados que no incluyen evaluaciones de este tipo, tal como se evidencia en trabajos realizados por Lacoste y Powles, (2014), Sønderskov et al. (2020) y D'amico et al. (2021), entre otros. Existen múltiples aspectos del impacto ambiental asociado al manejo agronómico que podrían ser considerados pero que exceden los objetivos del presente trabajo de tesis (producción de CO₂, lixiviación, pérdida de servicios ecosistémicos y calidad de agua).
- *Balance económico:* este módulo permite el cálculo del margen bruto anual teniendo en cuenta los costos de producción y los ingresos por venta de la cosecha, al igual que otros modelos (Benjamin et al., 2009; Parsons et al., 2009; Lacoste y Powles, 2014). Dado que el modelo propuesto permite analizar un horizonte de varios años, fue necesario cuantificar de qué manera los márgenes

brutos futuros se reflejaban en la actualidad, por ello se introdujo el valor actual (VA). Este índice permite establecer rápidamente (según su signo y magnitud), si resulta conveniente o no la adopción de estrategias de manejo específicas. El VA es una herramienta de análisis fundamental para la toma de decisiones a mediano y largo plazo. Una de las críticas dirigidas a este índice se fundamenta en la suposición de que los agricultores valoran más el dinero en el presente que en el futuro, tal como se señala en el estudio de Lacoste y Powles (2014). De todas formas, ambos indicadores son los más habituales e intuitivos para analizar la economía de la actividad (Lacoste y Powles, 2014, 2015).

Desde el punto de vista de la implementación computacional, el presente modelo, al estar construido en EXCEL, se podría modificar fácilmente y se beneficia de continuas y casi garantizadas actualizaciones por parte de Microsoft (Lacoste y Powles, 2016). Sin embargo, esta implementación también tiene sus limitaciones, como la incapacidad para manejar grandes cantidades de datos, ser propenso a errores al ingresar datos y efectuar cálculos en celdas, y requiere de habilidades de programación para modificar las funcionalidades de Visual Basic.

Desde el punto de vista de la bioecología de las especies maleza, la adaptación del modelo base a otras especies podría requerir de variables adicionales, como: producción de biomasa, ingreso de semillas foráneas, características de manejo o poblacionales típicas de otros agrosistemas, como se menciona por ejemplo para el caso del RIM en Lacoste y Powles (2015).

5.2 Conclusiones generales

El modelo de simulación desarrollado presenta aportes novedosos detallados en la sección anterior a la vez que la integración con herramientas preexistentes, como es el caso del modelo de predicción de la emergencia de AVEFA (Chantre et al., 2018), los modelos DSSAT (Jones et al., 2003) y RIM (Lacoste y Powles, 2014), índices de impacto

ambiental y económico (Kovach et al., 1992; Ferraro et al., 2003; Kniss y Coburn, 2015; Gaspars-Wieloch, 2019). Como se mencionó oportunamente, el modelo se basa en una premisa de simplicidad y versatilidad, para posibilitar una rápida adaptación a diferentes agrosistemas y nutrirse de distintas fuentes de información. Un exceso de simplicidad en los modelos de simulación puede llevar a que los resultados a veces no reflejen adecuadamente la compleja realidad de los agrosistemas simulados. Sin embargo, aunque modelos más complejos puedan, en teoría, proporcionar predicciones más precisas, no necesariamente agregan valor a la planificación práctica (Colas et al., 2020), y su adaptación a agrosistemas con características diferentes a las planteadas en su concepción original, puede resultar complejo o tedioso. El enfoque utilizado en este trabajo persigue un equilibrio para brindar veracidad a la simulación, y simplificar los procesos de ajuste de parámetros, calibración y validación con datos experimentales de campo. Entendemos, constituye una base objetiva a partir de la cual probar estrategias de manejo y estimar resultados con relativa certeza. De todas formas, al igual que con cualquier modelo de simulación, es fundamental entender las fuentes de incertidumbre que caracterizan a los agrosistemas regionales y la variabilidad que estas pueden generar sobre los resultados finales.

Los escenarios simulados se han seleccionado para que se asemejen a las prácticas agronómicas típicas, con el fin de ilustrar el alcance y la versatilidad del modelo. Sin embargo, dado que el número de alternativas es enorme en términos de tipos de control y decisiones de calendario, las intervenciones adoptadas están más bien "basadas en recetas" y pueden no reflejar de forma completamente realista la elección del agricultor en cada situación. Por ejemplo, en lugar de aplicar una medida de control en una fecha determinada, como se realizó en los experimentos de simulación, en la práctica se suele realizar un monitoreo para decidir una intervención, basándose en la densidad real de la maleza y en las previsiones meteorológicas. Estos criterios son bastante "artesanales" en la práctica y difíciles de integrar en los estudios de modelado tradicional. Sin embargo, el nivel de detalle desplegado por el modelo propuesto, el cual proporciona la densidad diaria de la maleza y posee una integración explícita con

el pronóstico meteorológico permitiría en principio implementar este tipo de decisiones.

Adicionalmente, si bien el modelo desarrollado está basado en los sistemas productivos del sudoeste y centro de la provincia de Buenos Aires, haciendo foco en las estrategias de manejo de dos especies de gran importancia regional, dadas sus características de adaptabilidad y arquitectura flexible, podría ser extensible a otros sistemas agronómicos. Lo anterior representa una innovación con miras al planeamiento sostenible y a la ayuda en la toma de decisiones integradas en sistema cultivo-maleza de importancia regional.

Una prestación adicional de los modelos de simulación de manejo de malezas es que constituyen un valioso punto de partida para capacitar a través de interacciones y propiciar el debate entre agricultores y asesores como lo demuestran numerosos antecedentes (Colas et al., 2020; Pannel et al., 2004; Lacoste y Powles, 2016; Sønderskov et al., 2020) y se comprobó también de forma personal durante el desarrollo del trabajo de tesis.

En conclusión, la integración con desarrollos previos permite avanzar en la disciplina ampliando el horizonte de resultados. El modelo desarrollado no solo constituye un avance hacia un SSD para el manejo de malezas, sino que también contribuye a la comunicación e interacción entre actores involucrados, generando nuevos puntos de vista, ayudando a la comprensión de los sistemas y ampliando el abanico de opciones.

5.3 Trabajo futuro

Aunque el enfoque propuesto parece proporcionar un equilibrio en términos de detalles biológicos, agronómicos, económicos y ambientales, a medida que se realizaba esta tesis se identificaron aspectos interesantes para profundizar que podrían extender las prestaciones del modelo desarrollado. Se pueden señalar varias extensiones para

futuras adaptaciones, las cuales en su mayoría requerirían de una gran cantidad de información específica y revisten una dificultad elevada. A continuación, se detallan las más relevantes:

- Modelado de agrosistemas multiespecie. Implica reconocer la coexistencia de varias especies espontáneas en competencia con uno o varios cultivos (Monjardino et al., 2003; Colbach, 2020). Para el desarrollo de futuros SSD aplicables al MIM, es fundamental mejorar la comprensión de los mecanismos de competencia y las interacciones entre plantas, con el objetivo de incorporarlas a los modelos de simulación (Westwood et al., 2018)
- Externalidades. Si bien los índices P y T representan una buena medida de los riesgos medioambientales asociados al manejo de malezas, sería óptimo contar con un módulo de cuantificación de externalidades. Este módulo permitiría disminuir el sesgo de los resultados y mejorar la cuantificación del impacto ambiental (Lodovichi et al., 2013; MacLaren et al., 2020). El módulo debería tener en cuenta: costo de la pérdida de servicios ecosistémicos, polinización, calidad de agua, calidad de suelo, e impacto sobre la salud humana.
- Resistencia. Implica cuantificar la evolución de la resistencia de las malezas en los estudios de largo plazo. Un posible enfoque simplista para tratar de forma directa las poblaciones resistentes es considerar la presencia de un biotipo resistente que evoluciona junto con uno susceptible en simulaciones a largo plazo, cada uno con diferentes eficiencias de herbicidas. Se trata de seguir la dinámica de ambos biotipos y su abundancia relativa como consecuencia de las estrategias de manejo.
- Variabilidad espacial. Para considerar la componente espacial, se podría por ejemplo realizar una adaptación del modelo para cada subsector del lote que posea características homogéneas. Esto permitiría tener en cuenta la distribución geográfica de las malezas y posibilitaría la realización de estudios espacio-temporales así como también integrar estrategias propias de la agricultura de precisión.
- Análisis de sensibilidad. Debido a que los modelos planteados requieren del ingreso de numerosos datos y parámetros que no siempre son fáciles de medir con

precisión, sería importante realizar un análisis de sensibilidad global para estudiar el impacto de su incertidumbre sobre cada una de las principales variables del sistema (Saltelli, 2005; Saltelli et al., 2008; Lacoste y Powles, 2015; Colas et al., 2021).

- Incertidumbre paramétrica. En los sistemas agronómicos existe una gran incertidumbre, en particular asociada a los parámetros climáticos (temperaturas, vientos, precipitaciones, etc.). En este contexto, los estudios estocásticos pueden ser necesarios para tener en cuenta dicha variabilidad (Holst et al., 2007; Benjamin et al., 2009; Gaspars-Wieloch, 2019).

En otro orden de ideas, también consideramos importante hacer disponible la herramienta en una plataforma que facilite su acceso y utilización por parte de productores, asesores y demás actores de la cadena agroindustrial. Este canal de comunicación se considera indispensable para obtener la retroalimentación de una comunidad de usuarios, a fin de validar los resultados específicos y el enfoque general del modelado. Idealmente, esta plataforma debería también posibilitar el acople entre modelos y herramientas complementarias de distinto origen, con el objetivo de permitir abordar de manera holística los problemas a los que se enfrentan de manera cotidiana los operadores de los agrosistemas.

En este sentido, actualmente se está llevando a cabo un proyecto interdisciplinar para presentar los resultados a través de una plataforma web con el fin de llegar a un público más amplio (agricultores, académicos y partes interesadas). En su versión actual, la plataforma web permite visualizar la emergencia diaria y acumulada de tres especies de maleza de interés en la región estudiada, incluyendo el modelo de emergencia de AVEFA utilizado en este trabajo, así como una versión de nuestro modelo para el sistema trigo-AVEFA que permite experimentar con fechas de siembra. Se espera en un futuro próximo incorporar otras versiones del modelo de simulación aquí presentado, así como otros módulos para ayudar en el proceso de toma de decisiones de los asesores y agricultores de la región.

Para complementar este esfuerzo, sería recomendable llevar a cabo una evaluación del uso de estas herramientas por parte de los usuarios. Esto permitiría obtener respuestas y opiniones de los extensionistas y productores motivados a utilizarlas, con el fin de identificar posibles áreas de mejora y zonas de interés para futuros desarrollos.

Finalmente, en el grupo de investigación se desarrolló un módulo de optimización destinado a automatizar la exploración de acciones de control, estrategias preventivas y rotaciones de cultivos (Damiani, 2021). Este algoritmo se implementó en el lenguaje de programación Python de código abierto. La integración del simulador con el algoritmo de optimización permite realizar exploraciones exhaustivas del espacio de soluciones para identificar las estrategias más prometedoras desde un punto de vista agronómico, teniendo en cuenta tanto el impacto ambiental como el beneficio económico. Este nivel de desarrollo representa un avance significativo en la capacidad del grupo de investigación para proporcionar soluciones eficientes y sostenibles en el ámbito agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

- Anón, 2022a. Revista Margenes agropecuarios. URL <https://www.margenes.com/> (consultado 4.1.22).
- Anón, 2022b. Bolsa de Cereales de Buenos Aires. URL <https://www.bolsadecereales.com/margenes-agricolas> (consultado 5.31.22).
- Anón, 2020. Bolsa de Cereales de Buenos Aires. URL <https://www.bolsadecereales.com/margenes-agricolas> (consultado 12.20.20).
- Asgarpour, R., Ghorbani, R., KHAJEH-HOSSEINI, M., GOLZARDI, F., ILKAEI, M.N., 2020. Seed Longevity of Spotted Spurge and Wild Poinsettia Under Diverse Environmental Conditions. *Planta Daninha* 38. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582020380100002>
- Australian Herbicide Resistance Initiative, 2023. Página web RIM. Aust. Herbic. Resist. Initiat. URL <https://www.ahri.uwa.edu.au/our-research/wim-weed-management-models/rim-ryegrass-integrated-management/> (consultado 3.8.23).
- Bagg, J., Banks, S., Baute, T., Bohner, H., Brown, C., Griffiths, H., Hall, B., Hayes, A., Johnson, P., Martin, H., McDonald, I., Payne, M., Quesnel, G., Reid, K., Spieser, H., Stewart, G., Tenuta, A., Schaafsma, A., 2002. Agronomy guide for field crops.
- Barina, Z., Shevera, M., Sîrbu, C., Pinke, G., 2013. Current distribution and spreading of *Euphorbia davidii* (*E. dentata* agg.) in Europe. *Cent. Eur. J. Biol.* 8, 87–95. <https://doi.org/10.2478/s11535-012-0111-7>
- Batlla, D., Malavert, C., Farnocchia, R.B.F., Benech-Arnold, R., 2020. Modelling Weed Seedbank Dormancy and Germination, en: Chantre, G.R., González-Andújar, J.L. (Eds.), *Decision Support Systems for Weed Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 61–83. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_4
- Beckie, H.J., Francis, A., Hall, L.M., 2012. The Biology of Canadian Weeds. 27. *Avena fatua* L. (updated). *Can. J. Plant Sci.* 92, 1329–1357. <https://doi.org/10.4141/cjps2012-005>
- Begon, M., Townsend, C.R., Harper, J.L., 2006. *Ecology : From Individuals to Ecosystems*, 4th ed. ed, Blackwell Publishing Ltd. Malden, MA 02148-5020, USA.
- Beltran, J.C., Pannell, D.J., Doole, G.J., 2012. Economic implications of herbicide resistance and high labour costs for management of annual barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in Philippine rice farming systems. *Crop Prot.* 31, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.09.012>
- Benjamin, L.R., Milne, A.E., Parsons, D.J., Cussans, J., Lutman, P.J.W., 2009. Using stochastic dynamic programming to support weed management decisions over a rotation. *Weed Res.* 49, 207–216. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00678.x>
- Berti, A., Dunan, C., Sattin, M., Zanin, G., Westra, P., 1996. A New Approach To Determine When to Control Weeds. *Weed Sci.* 44, 496–503. <https://doi.org/DOI: 10.1017/S0043174500094248>
- Bondarenko, O.Y., Myronov, S.L., 2021. *Euphorbia davidii* Subils (Euphorbiaceae) in flora of railway tracks of Dniester Bay Bar. *Odesa Natl. Univ. Herald. Biol.* 26, 101–108. [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2021.2\(49\).246891](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2021.2(49).246891)
- Borger, C.P.D., Riethmuller, G.P., Renton, M., 2018. Weed Seed Wizard: A tool that demonstrates the value of integrated weed management tactics such as harvest weed seed destruction. *Comput.*

- Electron. Agric. 147, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.011>
- Bowes, G.G., Thomas, A.G., 1978. Longevity of Leafy Spurge Seeds in the Soil following Various Control Programs. *J. Range Manag.* 31, 137. <https://doi.org/10.2307/3897664>
- Burns, E.E., Lehnhoff, E.A., Mckenzie, S.C., Maxwell, B.D., Dyer, W.E., Menalled, F.D., 2018. You cannot fight fire with fire: a demographic model suggests alternative approaches to manage multiple herbicide-resistant *Avena fatua*. *Weed Res.* 1–12. <https://doi.org/10.1111/wre.12315>
- Candisano MML, Scursioni JA. 2017. Control de *Avena fatua* mediante aplicación de herbicidas con distinto sitio de acción. *Agron. Ambient.* 37:115–122. <http://agronomiyambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/69>
- Cantamutto, M.A., Bertucci, C., Huarte, D., 2016. El trigo en el sudoeste bonaerense. :1–76. <https://inta.gov.ar/documentos/el-trigo-en-el-sudoeste-bonaerense>
- Cavalcante, N.B., Diego da Conceição Santos, A., Guedes da Silva Almeida, J.R., 2020. The genus *Jatropha* (Euphorbiaceae): A review on secondary chemical metabolites and biological aspects. *Chem. Biol. Interact.* 318, 108976. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2020.108976>
- Chantre, G.R., Blanco, A.M., Forcella, F., Van Acker, R.C., Sabbatini, M.R., Gonzalez-Andujar, J.L., 2014. A comparative study between non-linear regression and artificial neural network approaches for modelling wild oat (*Avena fatua*) field emergence. *J. Agric. Sci.* 152, 254–262. <https://doi.org/10.1017/S0021859612001098>
- Chantre, G.R., Blanco, A.M., Lodovichi, M. V., Bandoni, A.J., Sabbatini, M.R., López, R.L., Vigna, M.R., Gigón, R., 2012. Modeling *Avena fatua* seedling emergence dynamics: An artificial neural network approach. *Comput. Electron. Agric.* 88, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.07.005>
- Chantre, G.R., González-Andújar, J.L., 2020. Decision Support Systems for Weed Management, Decision Support Systems for Weed Management. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0>
- Chantre, G.R., Vigna, M.R., Renzi, J.P., Blanco, A.M., 2018. A flexible and practical approach for real-time weed emergence prediction based on Artificial Neural Networks. *Biosyst. Eng.* 170, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.014>
- Coble, H.D., Mortensen, D.A., 1992. The Threshold Concept and its Application to Weed Science. *Weed Technol.* 6, 191–195. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0890037X00034552>
- Colas, F., Cordeau, S., Granger, S., Jeuffroy, M.H., Pointurier, O., Queyrel, W., Rodriguez, A., Villerd, J., Colbach, N., 2020. Co-development of a decision support system for integrated weed management: Contribution from future users. *Eur. J. Agron.* 114, 126010. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126010>
- Colas, F., Gauchi, J.P., Villerd, J., Colbach, N., 2021. Simplifying a complex computer model: Sensitivity analysis and metamodelling of an 3D individual-based crop-weed canopy model. *Ecol. Modell.* 454, 109607. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109607>
- Colbach, N., 2020. How to Use a “Virtual Field” to Evaluate and Design Integrated Weed Management Strategies at Different Spatial and Temporal Scales, en: Chantre, G.R., González-Andújar, J.L. (Eds.), Decision Support Systems for Weed Management. Springer International Publishing, Cham, pp. 227–248. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_11
- Colbach, N., Busset, H., Yamada, O., Dürr, C., Caneill, J., 2006. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate: II. Evaluation. *Eur. J. Agron.* 24, 113–128. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.07.002>
- Colbach, N., Collard, A., Guyot, S.H.M., Mézière, D., Munier-Jolain, N., 2014. Assessing innovative sowing

- patterns for integrated weed management with a 3D crop: Weed competition model. *Eur. J. Agron.* 53, 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.019>
- Confalone, A., Vilatte, C., Lázaro, L., Roca, N., Mestelan, S., Aguas, L., Navarro, M., Sau, F., 2016. Parametrización del modelo CROPGRO-soybean y su uso como herramienta para evaluar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de soja. *Rev. la Fac. Ciencias Agrar.* 48, 49–64.
- Cousens, R., Weaver, S.E., Porter, J.R., Rooney, J.M., Butler, D.R., Johnson, M.P., 1992. Growth and development of *Avena fatua* L. (wild-oat) in the field. *Ann. Appl. Biol.* 120, 339–351. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1992.tb03430.x>
- Damiani L. 2021. Planificación óptima del manejo integrado de malezas.
- D'amico, M.B., Chantre, G.R., Calandrini, G.L., González-Andújar, J.L., 2021. Effect of barley sowing density on the integrated weed management of *lolium rigidum* (Annual ryegrass) in mediterranean dryland: A modeling approach. *Agronomy* 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081565>
- De San Celedonio RP, Micheloud JR, Abeledo LG, Miralles DJ, Slafer GA. 2014. Riesgo de anegamiento en trigo (*Triticum aestivum* L) para distintas localidades de la región triguera Argentina. *Cienc. del Suelo* 32:233–246. <http://hdl.handle.net/11336/4242>
- Doyle, C.J., 1991. Mathematical models in weed management. *Crop Prot.* 10, 432–444. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(91\)80130-8](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(91)80130-8)
- Eshenaur, B., Grant, J., Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., Tette, J., 2023. Environmental Impact Quotient: “A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides.”. New York State Integr. Pest Manag. Program, Cornell Coop. Extension, Cornell Univ. URL www.nysipm.cornell.edu/publications/EIQ (consultado 1.7.19 y 3.5.23).
- Ferraro, D.O., 2022. PRORIPEST. URL <http://proripest.malezas.agro.uba.ar/inicio.php> (consultado 5.9.22).
- Ferraro, D.O., Duarte Vera, A.C., Pessah, S., Ghersa, F., 2020. Environmental Risk Indicators for Weed Management: A Case Study of Ecotoxicity Assessment Using Fuzzy Logic, en: Chantre, G.R., González-Andújar, J.L. (Eds.), *Decision Support Systems for Weed Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 191–210. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_9
- Ferraro, D.O., Ghersa, C.M., Sznajder, G.A., 2003. Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 96, 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00017-3)
- Frank CE, Romero Forte FE, Montoya JC, Suárez C. 2013. Estudio sobre la biología poblacional del lecherón *Euphorbia dentata* y estrategias de control químico. <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/1512>
- Gardarin, A., Dürr, C., Colbach, N., 2012. Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecol. Modell.* 240, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004>
- Gaspars-Wieloch, H., 2019. Role of scenario planning and probabilities in economic decision problems – literature review and new conclusions. <https://doi.org/10.3846/cibmee.2019.011>
- Gigón R, Labarthe F, Lageyre LE, Vigna MR, López RL, Vergara M fernanda, Varela PE. 2008. Comunidades de malezas en cultivos de trigo en el Sur y Sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Available from: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-13__malezas_en_trigo.pdf
- Gigón, R., Massigogge, J., Istilart, C., 2013. Evaluación de Flumioxazin (sumisoya) para el control de gramíneas en cultivos de trigo y cebada en el centro sur de la provincia de Buenos Aires.

- Gonzalez-Andujar, J.L., Chantre, G.R., Morvillo, C., Blanco, A.M., Forcella, F., 2016. Predicting field weed emergence with empirical models and soft computing techniques. *Weed Res.* 56, 415–423. <https://doi.org/10.1111/wre.12223>
- Gonzalez-Andujar, J.L., Fernandez-Quintanilla, C., 2004. Modelling the population dynamics of annual ryegrass (*Lolium rigidum*) under various weed management systems. *Crop Prot.* 23, 723–729. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.12.007>
- Gonzalez-Andujar, J.L., Fernandez-Quintanilla, C., 1991. Modelling the Population Dynamics of *Avena sterilis* Under Dry-Land Cereal Cropping Systems. *J. Appl. Ecol.* 28, 16. <https://doi.org/10.2307/2404110>
- Govaerts R, Frodin DG, Radcliffe-Smith A. 2000. World Checklist and Bibliography of Euphorbiaceae (with Pandaceae): Croton -Excoecariopsis.
- Heap, I., 2020. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Online. <https://doi.org/10.1002/ps.3696>
- Heap, I., 2014. Global perspective of herbicide-resistant weeds. *Pest Manag. Sci.* <https://doi.org/10.1002/ps.3696> (consultado 4.1.23)
- Holst N. 2020. Mathematical Models. En: Chantre GR, González-Andújar JL, editores. *Decision Support Systems for Weed Management*. Cham: Springer International Publishing. p 3–23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_1
- Holst, N., Rasmussen, I.A., Bastiaans, L., 2007. Field weed population dynamics: A review of model approaches and applications. *Weed Res.* 47, 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00534.x>
- Istilart C, Yannicari M, Gigón R, Manso Lucrecia, Forjan Horacio. 2014. Control de lecherón (*Euphorbia davidii*) en post-emergencia de maíz resistente a glifosato. <http://hdl.handle.net/11336/53986>
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy*. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Juan, V.F., Marchessi, J.E., Núñez-Fré, F.R., 2011. Control de lecheron (*Euphorbia dentata*) con glifosato. *Rev. Espec. Malezas - Aapresid* 61–67.
- Juan, V.F., Saint-Andre, H., Fernandez, R.R., 2003. Competencia de lecheron (*Euphorbia dentata*) en soja. *Planta Daninha* 21, 175–180. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200002>
- Juan, V.F., Saint-André, H.M., 1997. Control of Lecheron (*Euphorbia dentata*) in soybean with imazethapyr applied at different developmental stages. XIII Congr. Latinoam. Malezas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3899.4086>
- Juan, V.F., Saint-André, H.M., 1995. Comportamiento de *Euphorbia dentata* en la Zona Centro de la Provincia de Buenos Aires Biología de la Germinación y sus Efectos Competitivos Sobre el Crecimiento de Soja, en: XII Congreso Latinoamericano de Malezas. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA URUGUAY, Montevideo, Uruguay, pp. 174–178.
- Juan, V.F., Saint-Andre, H.M., Fernandez, R.R., 2006. Control de lecheron (*Euphorbia dentata*) con glifosato. *Planta Daninha* 24, 347–352. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000200018>
- Juan, V.F., Saint-André, H.M., Fernández, R.R., Bazzano, J., Videla, M., 2002. Control de *Euphorbia dentata* con diferentes formulaciones de glifosato en soja transgenica resistente a glifosato. *Rev. Bras. Herbic.* 3, 29. <https://doi.org/10.7824/rbh.v3i1.368>
- Juan, V.F., Saint-André, H.M., Fernández, R.R., Videla, M., Bazzano, J., 2000. Control de *Euphorbia dentata* en soja con herbicidas post-emergentes. *Rev. Bras. Herbic.* 1, 147. <https://doi.org/10.7824/rbh.v1i2.329>

- Kniss, A.R., Coburn, C.W., 2015. Quantitative evaluation of the Environmental Impact Quotient (EIQ) for comparing herbicides. *PLoS One* 10, 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131200>
- Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., Tette, J., 1992. A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides. *New York's Food Life Sci. Bull.* 1–8.
- Lacoste, M., Powles, S., 2016. Beyond modelling: Considering user-centred and post-development aspects to ensure the success of a decision support system. *Comput. Electron. Agric.* 121, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.003>
- Lacoste, M., Powles, S., 2015. RIM: Anatomy of a Weed Management Decision Support System for Adaptation and Wider Application. *Weed Sci.* 63, 676–689. <https://doi.org/10.1614/ws-d-14-00163.1>
- Lacoste, M., Powles, S., 2014. Upgrading the RIM Model for Improved Support of Integrated Weed Management Extension Efforts in Cropping Systems. *Weed Technol.* 28, 703–720. <https://doi.org/10.1614/WT-D-14-00020.1>
- Langston, V.B., Harger, T.R., Johnsey, P.S., 1984. Potential for Adventitious Regeneration of Selected Weed Species. *Weed Sci.* 32, 360–363.
- Lindsay, K., Popp, M., Norsworthy, J., Bagavathiannan, M., Powles, S., Lacoste, M., 2017. PAM: Decision Support for Long-Term Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) Control. *Weed Technol.* 31, 915–927. <https://doi.org/10.1017/wet.2017.69>
- Lodovichi M V., Blanco AM, Chantre GR, Bandoni JA, Sabbatini MR, Vigna M, López R, Gigón R. 2013. Operational planning of herbicide-based weed management. *Agric. Syst.* 121:117–129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2013.07.006>
- López, R., 1989. INTA EEA Bordenave. Estudios de bioecología y control de malezas gramíneas en los cultivos de cereales del S.O. de Buenos Aires. Informe anual.
- López, R., Vigna, M.R., s/f. INTA EEA Bordenave. Studies on bioecology and grass weed control in cereal crops in southwest Buenos Aires. Annual reports 1989-1994.
- López, R.L., Vigna, M.R., 2004. INTA EEA Bordenave. Estudios de bioecología y control de malezas gramíneas en los cultivos de cereales del sudoeste de Buenos Aires. Informes anuales 1989-2004.
- MacLaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., Dehnen-Schmutz, K., 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agron. Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6>
- Marchessi, J.E., Subils, R., Scaramuzzino, R.L., Crosta, H.N., Ezeiza, M.F., André, H.M. Saint, Juan, V.F., 2011. Presencia de *Euphorbia davidii* Subils (Euphorbiaceae) en la Provincia de Buenos Aires: morfología y anatomía de la especie Presence of *Euphorbia davidii* Subils (Euphorbiaceae) in Buenos Aires Province: morphology and anatomy. *Kurtziana* 36, 45–53.
- Martín, A.N., Scursoni, J.A., 2018. Avena fatua L. escapes and delayed emergence in wheat (*Triticum aestivum* L.) crops of Argentina. *Crop Prot.* 103, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.08.020>
- Matsuhashi, S., Asai, M., Fukasawa, K., 2021. Estimations and projections of *Avena fatua* dynamics under multiple management scenarios in crop fields using simplified longitudinal monitoring. *PLoS One* 16, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245217>
- Mayfields, M.H., 1997. A systematic treatment of *Euphorbia* subgenus *Poinsettia* (Euphorbiaceae). University of Texas.
- Meira, S., Rodríguez Baide, J.M., Confalone, A., Fatecha Fois, D.A., Fernandes, J.M., González Pérez, O., Berg, M. Van den, 2019. Modelación del cultivo de soja en Latinoamérica Estado del arte y base de

- datos para parametrización. <https://doi.org/10.2760/639226>
- Menalled, F.D., 2010. Consideraciones ecológicas para el desarrollo de programas de manejo integrado de malezas. *Agroecología* 5, 73–78.
- Menegat, A., Jäck, O., Gerhards, R., 2017. Modelling of low input herbicide strategies for the control of wild oat in intensive winter wheat cropping systems. *F. Crop. Res.* 201, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.016>
- Monjardino, M., Pannell, D.J., Powles, S.B., 2003. Multispecies Resistance and Integrated Management: A Bioeconomic Model for Integrated Management of Rigid Ryegrass (*Lolium rigidum*) and Wild Radish (*Raphanus raphanistrum*). *Weed Sci.* 51, 798–809.
- Núñez-Fré, F., Juan, V., Saint André, H., Fernández, R., 2015. Evaluación de herbicidas residuales complementando a glifosato para el control de *Euphorbia davidii* Subils en barbechos. p. 90.
- Núñez-Fré, F.R., 2019. Manejo de *Euphorbia davidii* Subils: Dinámica poblacional, control químico y evaluación de sensibilidad a glifosato. Tesis Magister. Universidad Nacional del Sur.
- Núñez-Fré, F.R., Juan, V.F., Chantre, G., 2014. Distribución vertical del banco de semillas de *Euphorbia davidii* subils, en lotes agrícolas de la zona centro de la provincia de buenos aires, Argentina. *Planta Daninha* 32, 709–718. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582014000400005>
- Núñez-Fré, F.R., JUAN, V.F., SAINT ANDRÉ, H.M., CHANTRE, G.R., 2018. Demographic and Phenological Studies on David's Spurge (*Euphorbia davidii*) in the Central Area of Buenos Aires Province, Argentina. *Planta Daninha* 36, 1–14. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582018360100088>
- Núñez Fré, F.R., Juan, V.F., Saint-André, H.M., Chantre, G.R., 2022. Efficacy of glyphosate on David Spurge (*Euphorbia davidii* Subils) control under different levels of P and S / Eficácia do glyphosate no controle David Spurge (*Euphorbia davidii* Subils) em diferentes níveis de P e S. *Brazilian J. Anim. Environ. Res.* 5, 1090–1104. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-082>
- Oerke, E.C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144, 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Ojelade, B.S., Durowoju, O.S., Adesoye, P.O., Gibb, S.W., Ekosse, G.I., 2022. Review of Glyphosate-Based Herbicide and Aminomethylphosphonic Acid (AMPA): Environmental and Health Impacts. *Appl. Sci.* 12. <https://doi.org/10.3390/app12178789>
- Oprea, A., Barina, Z., Sîrbu, C., 2012. *Euphorbia Davidii* Subils (*Euphorbiaceae*)-an Alien Species New To the Romanian Flora. *Contrib. Bot.* XLVII, 7–12.
- Palma-Bautista, C., Rojano-Delgado, A.M., Vázquez-García, J.G., Yanniccari, M., Prado, R. De, 2020. Resistance to Fomesafen, Imazamox and Glyphosate in *Euphorbia heterophylla* from Brazil. *Agronomy* 10, 1573. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101573>
- Pannell, D.J., Stewart, V., Bennett, A., Monjardino, M., Schmidt, C., Powles, S.B., 2004. RIM: A bioeconomic model for integrated weed management of *Lolium rigidum* in Western Australia. *Agric. Syst.* 79, 305–325. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00089-1)
- Parsons, D.J., Benjamin, L.R., Clarke, J., Ginsburg, D., Mayes, A., Milne, A.E., Wilkinson, D.J., 2009. Weed Manager-A model-based decision support system for weed management in arable crops. *Comput. Electron. Agric.* 65, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.08.007>
- Royo-Esnaola, A., Torra, J., Chantre, G.R., 2020. Weed Emergence Models, en: Chantre, G.R., González-Andújar, J.L. (Eds.), *Decision Support Systems for Weed Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 85–116. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_5
- Sadras, V.O., Monzon, J.P., 2006. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *F. Crop. Res.* 99, 136–146.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.04.003>

- Saltelli, A., 2005. Global Sensitivity Analysis : An Introduction. *Sensit. Anal. Model Output* 27–43.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., 2008. *Global Sensitivity Analysis: The Primer* by Andrea Saltelli, Marco Ratto, Terry Andres, Francesca Campolongo, Jessica Cariboni, Debora Gatelli, Michaela Saisana, Stefano Tarantola, *International Statistical Review*. https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2008.00062_17.x
- Satorre, E.H., Snaydon, R.W., 1992. A comparison of root and shoot competition between spring cereals and *Avena fatua* L. *Weed Res.* 32, 45–55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1992.tb01861.x>
- Scursoni, J., Benech-Arnold, R., Hirchoren, H., 1999. Demography of Wild Oat in Barley Crops: Effect of Crop, Sowing Rate, and Herbicide Treatment. *Agron. J.* 91, 478. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030020x>
- Scursoni, J.A., 2001a. Demography of *Avena fatua* L. in production systems of beer barley (*Hordeum vulgare* L.) under different agronomic management practices. University of Buenos Aires.
- Scursoni, J.A., 2001b. Demografía de *Avena fatua* L. en sistemas de producción de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) bajo diferentes prácticas de manejo agronómico. Universidad de Buenos Aires.
- Scursoni, J.A., Benech Arnold, R., 2002. Effect of nitrogen fertilization timing on the demographic processes of wild oat (*Avena fatua*) in barley (*Hordeum vulgare*). *Weed Sci.* 50, 616–621. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0616:EONFTO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0616:EONFTO]2.0.CO;2)
- Scursoni, J.A., Gigón, R., Martín, A.N., Vigna, M., Leguizamón, E.S., Istilart, C., López, R., 2014. Changes in Weed Communities of Spring Wheat Crops of Buenos Aires Province of Argentina. *Weed Sci.* 62, 51–62. <https://doi.org/10.1614/WS-D-12-00141.1>
- Scursoni, J.A., Martín, A., Abbati, P., Bastanchuri, M., Gueventter, M., Iorio, D.E., Pulido, A., Sherriff, T., Quistre, J., 2021. Crecimiento, supervivencia y fecundidad de individuos de *Avena fatua* L. tratados con herbicidas inhibidores de ALS e inhibidores de ACCasa. *Rev. Investig. Agropecu.* 47, 361–366.
- Scursoni, J.A., Martín, A., Catanzaro, M.P., Quiroga, J., Goldar, F., 2011. Evaluation of post-emergence herbicides for the control of wild oat (*Avena fatua* L.) in wheat and barley in Argentina. *Crop Prot.* 30, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.09.003>
- Scursoni, J.A., Satorre, E.H., 2005. Barley (*Hordeum vulgare*) and Wild Oat (*Avena fatua*) Competition Is Affected by Crop and Weed Density 1. *Weed Technol.* 19, 790–795. <https://doi.org/10.1614/WT-03-065R.1>
- Scursoni, J.A., Vera, A.C.D., Oreja, F.H., Kruk, B.C., De La Fuente, E.B., 2019. Weed management practices in Argentina crops. *Weed Technol.* 33, 459–463. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.26>
- Sønderskov, M., Somerville, G.J., Lacoste, M., Jensen, J.E., Holst, N., 2020. DK-RIM: Assisting Integrated Management of *Lolium multiflorum*, Italian Ryegrass. *Agronomy* 10, 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060856>
- Spokas, K., Forcella, F., 2009. Software Tools for Weed Seed Germination Modeling. *Weed Sci.* 57, 216–227. <https://doi.org/10.1614/WS-08-142.1>
- Tanveer, A., Khaliq, A., Javaid, M.M., Chaudhry, M.N., Awan, I., 2013. Implications of weeds of genus *euphorbia* for crop production: a review. *Planta Daninha* 31, 723–731. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582013000300024>
- Torra, J., Monjardino, M., 2020. Ryegrass Integrated Management (RIM)–Based Decision Support System, en: Chantre, G.R., González-Andújar, J.L. (Eds.), *Decision Support Systems for Weed Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 249–278. <https://doi.org/10.1007/978->

- Travasso, M.I., Magrin, G.O., 1998. Utility of CERES-Barley under Argentine conditions. *F. Crop. Res.* 57, 329–333. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00079-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00079-3)
- Tudi, M., Li, Hairong, Li, Hongying, Wang, L., Lyu, J., Yang, L., Tong, S., Yu, Q.J., Ruan, H.D., Atabila, A., Phung, D.T., Sadler, R., Connell, D., 2022. Exposure Routes and Health Risks Associated with Pesticide Application. *Toxics* 10, 1–23. <https://doi.org/10.3390/toxics10060335>
- University of Hertfordshire, 2022. PPDB: Pesticide Properties DataBase. URL <https://sitem.herts.ac.uk/> (consultado 4.30.22).
- Vigna, M.R., Gigón, R., López, R.L., 2013. Presencia de poblaciones de Avena fatua L. resistente a herbicidas en Argentina, en: RÍOS, A. (Ed.), Viabilidad del glifosato en sistemas productivos sustentables. INIA, Montevideo (Uruguay).
- Vladimirov, V., Petrova, A.S., Zieliński, J., 2014. A new alien species of Clematis (Ranunculaceae) to the Bulgarian flora. *Comptes Rendus L'Academie Bulg. des Sci.* 67, 671–674.
- Weaver, S.E., Kropff, M.J., Cousens, R., 1993. A simulation model of Avena fatua L. (wild-oat) growth and development. *Ann. Appl. Biol.* 122, 537–554. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1993.tb04056.x>
- Westwood, J.H., Charudattan, R., Duke, S.O., Fennimore, S.A., Marrone, P., Slaughter, D.C., Swanton, C., Zollinger, R., 2018. Weed Management in 2050: Perspectives on the Future of Weed Science. *Weed Sci.* 66, 275–285. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>

ANEXO I

AI.1. Módulo económico

AI.1.1 Margen Bruto (MB)

Constituye una herramienta directa para estimar cómo incide el empleo de diferentes estrategias de manejo sobre los resultados económicos de la actividad agronómica. Los márgenes brutos directos (MB) exponen comparativamente la diferencia existente entre el valor bruto de la producción (ingreso bruto) y el costo directo asociado a dicha actividad. En esta tesis el MB se calcula anualmente según Ecuación AI.1.

$$MB_y = IB_y - CD_y \quad (AI.1)$$

donde MB_y es el margen bruto directo anual en el año y ; IB_y es el ingreso bruto anual de la actividad en y ; CD_y son los costos directos anuales de la actividad en y .

Se entiende como ingreso bruto a la cifra en dinero que resulta de multiplicar el rendimiento del cultivo por el precio bruto (Ecuación AI.2). En otras palabras, esta variable representa el beneficio que se obtiene por la venta del producto

$$IB_y = RC_y \cdot Prc \quad (AI.2)$$

donde IB es el ingreso bruto anual de la actividad en y [USD.ha⁻¹]; RC_y es el rendimiento anual del cultivo en y [t.ha⁻¹] y Prc es el precio de venta del producto del cultivo en y [USD.t⁻¹].

Dado que el margen bruto se utilizará para estimar el beneficio (o pérdida) resultante de aplicar las diferentes estrategias de manejo a fin de poder compararlas, en su cálculo sólo se consideró la influencia de los costos directos (CD), es decir, los gastos directos ocasionados por la actividad (Ecuación AI.3). Por simplicidad, los gastos indirectos (ej. costos de agua, alquiler y/o depreciación de maquinaria, etc.) no se tuvieron en cuenta porque dependen de diversos factores y se requiere gran cantidad de información adicional para poder especificarlos. Los mismos se podrían incluir en el cálculo sin mayor dificultad de contarse con la totalidad de la información.

$$CD_y = GCyC_y + GS_y + GC_y \quad (AI.3)$$

donde GCyC_y son los gastos por cosecha y comercialización del cultivo en el año y ; GS_y son los gastos asociados a la siembra del cultivo en y ; GC_y son los gastos asociados a los métodos de control implementados en y . A continuación, se detalla cada uno de ellos.

Gastos por cosecha y comercialización (GCyC_y): dependen de varios parámetros, como por ejemplo la maquinaria a utilizar en la cosecha, el rinde del cultivo, la superficie a cosechar y la cadena de comercialización, entre otros. Debido a que existen numerosas alternativas de cosecha y comercialización, cuya desagregación escapan a los alcances generales de esta tesis, se los calcula como un porcentaje de los ingresos por venta del producto (Ecuación AI.4) (Anón, 2022). Este porcentaje varía de acuerdo al tipo de cultivo cosechado.

$$GCyC_y = \%GCC \cdot RC_y \cdot Prc \quad (AI.4)$$

donde $GCyC_y$ son los gastos anuales por cosecha y comercialización [$USD.ha^{-1}$]; $\%GCC$ es el porcentaje de ingresos que corresponde a los gastos de cosecha y comercialización según el tipo de cultivo cosechado [%]; RC_y es el rendimiento anual del cultivo [$t.ha^{-1}$] y Prc es el precio de venta del producto [$USD.t^{-1}$].

Gastos por siembra del cultivo (GS_y): Son todos los gastos asociados a la siembra del cultivo, incluyendo semilla, labor de siembra, inoculante, fertilizante, etc.

Gastos por control de la maleza (GC_y): son los gastos asociados a los métodos de control implementados. Se determinan anualmente como la suma de todos los gastos originados por la compra de insumos y la aplicación de cada método de control (químico o mecánico) seleccionado en cada año de la simulación (Ecuación AI.5). Los mismos se determinan de acuerdo al costo según tipo de control elegido y a la cantidad de aplicaciones por hectárea, sumándole a este un costo fijo por aplicación (el cual es independiente del control escogido).

$$GC_y = \sum_{CM=1}^{Cntrl_y} (PC_{CM} \cdot DCntrl_{CM} + CA) \quad (AI.5)$$

donde GC_y son los gastos anuales por la compra de insumos y aplicación de los métodos de control [$USD.ha^{-1}$]; $Cntrl_y$ son la cantidad de métodos de control utilizados en y ; PC_{CM} es el precio del insumo correspondientes a cada método de control de malezas (CM) [$USD.L^{-1}$ o Kg]; $DCntrl_{CM}$ es la dosis requerida de herbicida (o el combustible de la herramienta de labranza en caso de control mecánico) [L o $Kg.ha^{-1}$]; CA es el costo fijo por la aplicación del método de control seleccionado [$USD.ha^{-1}$].

AI.1.2 Valor Actual (VA)

El modelo de simulación propuesto permite analizar horizontes de varios años aplicando diferentes estrategias de manejo, por lo tanto, es necesario incorporar una metodología para poder evaluar la viabilidad económico-financiera de las diferentes alternativas teniendo en cuenta el valor temporal del dinero. En este trabajo, se emplea uno de métodos más comúnmente utilizados: el valor actual (VA) o Valor Presente (Gaspars-Wieloch, 2019).

La metodología consiste en descontar al momento actual, es decir, actualizar mediante una tasa de interés determinada, todos los flujos de dinero futuros. En otras palabras, se trata de determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto. Cabe aclarar que, en esta tesis, el término “proyecto” hace referencia a las distintas estrategias de MIM que se podrían implementar.

El VA (Ecuación AI.6) depende de las siguientes variables:

Flujos netos de efectivo (F_y): representan la diferencia entre los ingresos y gastos que podrán obtenerse por la ejecución de un proyecto durante su vida útil.

Tasa de descuento (r): también conocida como costo o tasa de oportunidad. Es la tasa de retorno requerida sobre una inversión. Refleja la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente.

Número de períodos que dure el proyecto (n).

$$VA = \sum_{y=1}^n \frac{F_y}{(1+r)^y} \quad (AI.6)$$

De acuerdo al modelo planteado en esta tesis, el margen bruto anual (MBy) descrito en la sección anterior equivale al flujo neto de efectivo.

Evaluando el signo y magnitud del VA es posible establecer rápidamente la conveniencia económica de realizar cierto proyecto, siendo una herramienta de análisis fundamental en la toma de decisiones. Los criterios de decisión se basan en las siguientes reglas:

- $VA > 0$: Establece que el valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión a la tasa de descuento elegida generará beneficios, por lo cual el proyecto podría ejecutarse. Para el caso de proyectos mutuamente excluyentes, donde se debe optar por uno u otro, debe elegirse el que presente el mayor valor actual.
- $VA = 0$: Este resultado no significa que el proyecto no genere beneficios, sino que éstos apenas alcanzan a cubrir las expectativas.
- $VA < 0$: Esta situación implica que los beneficios son inexistentes, o bien, que no son suficientes. Esto indicaría que el proyecto no debería realizarse.

De esta manera, el valor actual sirve para guiar dos tipos de decisiones: establecer si el proyecto es rentable y evaluar qué proyecto, o estrategia de manejo de malezas en nuestro caso, es mejor que otro en términos absolutos.

AI.2. Módulo de impacto ambiental

AI.1.3 Coeficiente de Impacto Ambiental (EIQ)

Una de las metodologías más populares para cuantificar el impacto ambiental del control químico es el EIQ (Kovach et al., 1992). El EIQ (Environmental Impact Quotient) proporciona una medida del riesgo global del ingrediente activo, teniendo en cuenta los efectos sobre el medio ambiente y la salud pública.

Cada herbicida suele estar compuesto por uno o varios ingredientes activos (ia), que le confieren las propiedades necesarias para poder eliminar las malezas con cierta eficiencia. Cada ia tiene asociado un cierto coeficiente de impacto ambiental (EIQ_{ia}). El EIQ_{ia} se calcula para cada ingrediente activo teniendo en cuenta ocho categorías: efectos toxicológicos en los aplicadores de plaguicidas, recolectores y consumidores, contaminación de las aguas subterráneas, efectos acuáticos y efectos toxicológicos en las aves, abejas e insectos beneficiosos. El EIQ_{ia} se encuentra estandarizado para diferentes ia usados comercialmente y sus valores se encuentran disponibles en Eshenaur et al., (2023).

Una medida más útil de la evaluación del riesgo en los agrosistemas podría obtenerse multiplicando el EIQ_{ia} por la concentración de las formulaciones aplicadas y la dosis de aplicación en el campo. Este EIQ de campo es más apropiado para comparar los plaguicidas y sus efectos relativos (Kniss y Coburn, 2015). De esta manera, es posible comparar el impacto de diferentes métodos de control químico, mediante la Ecuación A1.7:

$$EIQ_y = \sum ia \cdot Dosis_{CM} \cdot EIQ_{ia} \quad (A1.7)$$

donde EIQ_y es la suma de los coeficientes de impacto ambiental producido por la aplicación de herbicidas en el año y ; ia es la concentración del ingrediente activo en la formulación del herbicida (dato obtenido de la etiqueta del producto o guía fitosanitaria) [%]; $Dosis_{CM}$ es la cantidad de herbicida que se aplica por hectárea [L o $Kg \cdot ha^{-1}$] (dato obtenido de la etiqueta del producto o guía fitosanitaria) y EIQ_{ia} es el coeficiente de impacto ambiental de cada ia el herbicida.

Si bien el EIQ es uno de los indicadores de impacto más populares en estudios agronómicos, en los últimos años su validez ha sido cuestionada (Kniss y Coburn, 2015).

Una de las críticas a este método es que, al combinarse una gran cantidad de datos cuantitativos en un solo valor cualitativo, se pierde información valiosa. Además, se le objeta su precisión, ya que depende fuertemente de supuestos subyacentes y de la combinación matemática de datos. Asimismo, se han señalado problemas en el escalado y la ponderación de la información cuantitativa del riesgo, ya que se ha notado que ciertos riesgos que difieren en órdenes de magnitud pueden recibir la misma calificación cualitativa (Kniss y Coburn, 2015). Adicionalmente, el EIQ está diseñado únicamente para cuantificar el impacto de los agroquímicos y no refleja las consecuencias producidas por otras acciones de control de malezas de suma importancia en el MIM, en particular, las labranzas de suelo.

A pesar de las críticas, su practicidad y amplia difusión entre profesionales del agro a la vez que su extenso uso en la literatura científica han motivado su adopción con fines comparativos en la presente tesis.

AI.1.4 Índices de Riesgo

Con el objetivo de ampliar la capacidad de estimación del impacto ambiental y teniendo en cuenta las críticas mencionadas sobre el EIQ, en este trabajo de tesis se decidió incorporar también índices de herbicidas (P) y de labranza (T) (Ferraro et al., 2003, 2020; Ferraro, 2022).

A continuación, se describe brevemente el procedimiento para establecer cada índice en particular.

Índice de herbicidas (P)

El índice de pesticidas (P) indica el impacto total del uso de pesticidas en cada lote agrícola, en un año (o campaña) analizada y se calcula integrando indicadores de peligro, sobre Insectos (I), Mamíferos (M) y Peces (F). Estos indicadores evalúan el peligro ecotoxicológico de las materias activas presentes en los pesticidas (Ferraro, 2022).

A cada ingrediente activo presente en los diferentes herbicidas se les asocia cierto grado de toxicidad sobre insectos, mamíferos y peces que se puede representar a través de la dosis letal media aguda (DL50). Dicha dosis hace referencia a la cantidad de sustancia necesaria, en ingestión única, que provoca la muerte del 50% del total de individuos que la ingieren. Cuanto menor sea la cantidad de principio activo requerida para alcanzarla, mayor será la toxicidad del mismo.

El cálculo de P se basa principalmente en la toxicidad y la dosis de ingrediente activo empleada por hectárea, más allá del tipo de formulación, la forma de incorporarlos o su clasificación química. De esta manera, por cada herbicida utilizado, es necesario especificar: (i) dosis aplicada de ingrediente activo [$\text{mg de i.a. ha}^{-1}$] (D); (ii) dosis letal media oral aguda en abejas [$\mu\text{g de i.a. abeja}^{-1}$] (LD_{50a}); (iii) dosis letal media oral aguda en ratas [$\text{mg de i.a. kg rata}^{-1}$] (LD_{50r}); y (iiii) dosis letal media oral a las 96 hs en peces [mg de i.a. L^{-1}] (LD_{50f}).

A partir de estos datos, propios de cada ingrediente activo, es posible estimar la magnitud de la toxicidad en insectos (T_{ins}), mamíferos (T_{mam}) y peces (T_{fish}) para cada herbicida (Ecuaciones AI.8 a AI.10 respectivamente), medidas en unidades tóxicas [tu]:

$$T_{\text{ins}} = D/\text{LD}_{50i} \tag{AI.8}$$

$$T_{\text{mam}} = D/LD_{50r} \quad (\text{AI.9})$$

$$T_{\text{fish}} = D/LD_{50f} \quad (\text{AI.10})$$

donde T_{ins} , T_{mam} y T_{fish} es la toxicidad en insectos, mamíferos y peces respectivamente [tu]; D es la dosis aplicada [mg de ia .ha⁻¹]; LD_{50i}, LD_{50m} y LD_{50f} es la dosis letal media aguda en abejas, ratas y peces.

Dado que en un lote pueden aplicarse varios tipos de herbicidas a lo largo de una temporada y, a su vez, cada uno de ellos puede tener más de un ingrediente activo, es necesario determinar la toxicidad total sobre insectos, mamíferos y peces. Dicho valor se puede obtener con la suma de la toxicidad generada por cada ingrediente activo, ya que se los considera agentes tóxicos independientes entre sí (Ecuación AI.11 a AI.13). Se asume que no hay efectos sinérgicos ni antagónicos.

$$\text{Sum}(T_{\text{ins}}) = \sum_{ia=1}^{iat} T_{\text{ins}, ia} \quad (\text{AI.11})$$

$$\text{Sum}(T_{\text{mam}}) = \sum_{ia=1}^{iat} T_{\text{mam}, ia} \quad (\text{AI.12})$$

$$\text{Sum}(T_{\text{fish}}) = \sum_{ia=1}^{iat} T_{\text{fish}, ia} \quad (\text{AI.13})$$

donde $\text{Sum}(T_{\text{ins}})$, $\text{Sum}(T_{\text{mam}})$ y $\text{Sum}(T_{\text{fish}})$ son las sumatorias de las toxicidades en insectos, mamíferos y peces respectivamente (medidas en unidades tóxicas tu); iat es la cantidad total de ingredientes activos presentes en todos los herbicidas aplicados por hectárea y por año; $T_{\text{ins},ia}$, $T_{\text{mam},ia}$ y $T_{\text{fish},ia}$ es la toxicidad en mamíferos y en insectos respectivamente por cada ingrediente activo (medidas en unidades tóxicas tu).

Posteriormente, con estos datos, se calcula el índice de toxicidad en insectos (I), mamíferos (M) y peces (F) (Ecuación AI.14 a AI.16).

$$I = \text{Mín} \left[1, - \left\{ \left(\frac{1}{\text{Mín}(T_{\text{ins}}) - \text{Max}(T_{\text{ins}})} \right) \cdot (\text{Sum}(T_{\text{ins}}) - \text{Mín}(T_{\text{ins}})) \right\} \right] \quad (\text{AI.14})$$

$$M = \text{Mín} \left[1, - \left\{ \left(\frac{1}{\text{Mín}(T_{\text{mam}}) - \text{Max}(T_{\text{mam}})} \right) \cdot (\text{Sum}(T_{\text{mam}}) - \text{Mín}(T_{\text{mam}})) \right\} \right] \quad (\text{AI.15})$$

$$F = \text{Mín} \left[1, - \left\{ \left(\frac{1}{\text{Mín}(T_{\text{fish}}) - \text{Max}(T_{\text{fish}})} \right) \cdot (\text{Sum}(T_{\text{fish}}) - \text{Mín}(T_{\text{fish}})) \right\} \right] \quad (\text{AI.16})$$

donde I, M y F son los índices de toxicidad en insectos, mamíferos y peces respectivamente; Mín(T) es el valor mínimo de toxicidad para insectos, mamíferos y peces, según corresponda; Máx(T) es el máximo valor de toxicidad aceptable (corresponde a la suma de unidades tóxicas del producto registrado y aprobado¹, que aplicado a su dosis máxima recomendada resulta más toxico para insectos, mamíferos y peces, según corresponda); Sum(T) son las sumatorias de toxicidad.

Finalmente, para determinar el impacto total anual de los herbicidas en una hectárea, ambos índices se integran a través de una regla típica de la lógica difusa, que permite establecer el índice de herbicidas (P_y) según la Ecuación AI.17

$$P_y = \frac{\sum_{k=1}^n \min[\mu(x_j)]_k \cdot C_k}{\sum_{k=1}^n \min[\mu(x_j)]_k} \quad (\text{AI.17})$$

donde P_y es el índice de herbicidas para el año o campaña y; $\mu(x_j)$ es el valor de las Ecuaciones AI.14 a AI.16 (j = I, M y F) y C_k son los valores de la regla de decisión del Sugeno, que integra los valores extremos de I, M y F.

¹ En el Registro Nacional de Terapéutica Vegetal, a marzo 2022, y utilizado en alguno de los siguientes cultivos extensivos: Trigo, Cebada, Centeno, Avena, Maíz, Girasol, Soja y Algodón.

<https://aps2.senasa.gov.ar/vademecum/app/publico/formulados>

Índice de labranza (T)

Según Ferraro y col. (2003), el impacto que puede producir la labranza en el suelo se determina a partir de dos variables importantes: el tipo de herramienta de labranza a utilizar y la clase de capacidad de uso que tiene el suelo.

Las herramientas que pueden emplearse para la labranza son variadas. Dentro de las más usadas se encuentran el arado de disco y la rastra de disco. Los efectos del uso de cada una de estas herramientas se evalúan en dos de las propiedades del suelo que se considera que resultan más perjudicadas por la actividad: la cantidad de rastrojo restante luego de la labranza (STU) y la estabilidad de los agregados del suelo (STA), es decir, de la estabilidad de las partículas individuales de arena, limo y arcilla cuando se agrupan o unen entre sí. Valores bajos de STU indican que la cantidad de biomasa remanente en el rastrojo es mínima, mientras que valores pequeños de STU representan estabilidades bajas de los agregados al suelo. Estos factores se determinan en función del tipo de herramienta de labranza (Tabla AI.1) y miden la capacidad que posee cada una de ellas para provocar condiciones que podrían favorecer la erosión hídrica y eólica.

Tabla AI.1: Valores de STU y STA de las herramientas de labranza más utilizadas

Herramienta de labranza	STU	STA
Arado de disco	0,10	0,20
Rastra de discos	0,30	0,20

Con estos dos factores de impacto parcial, se calcula un peso promedio para establecer el impacto de cada herramienta de labranza (T_{imp}) según la Ecuación AI.18 y el impacto total de todas las labranzas realizadas en el campo por año ($\text{Sum}(T_{imp})_y$) como indica la Ecuación AI.19:

$$T_{imp} = 1 - (0,6 \text{ STU} + 0,4 \text{ STA}) \quad (\text{AI.18})$$

$$\text{Sum}(T_{\text{imp}})_y = \sum_{nl=1}^{nlt} T_{\text{imp}nl,y} \quad (\text{AI.19})$$

donde $\text{Sum}(T_{\text{imp}})_y$ es la sumatoria del impacto sobre el suelo de todas las herramientas de labranza utilizadas en el año o campaña agrícola y ; nlt representa todas las herramientas de labranza que se usaron por hectárea en una campaña dada; $T_{\text{imp}nl,y}$ es el impacto de cada herramienta de labranza empleada sobre el suelo ese año o campaña; STU es la cantidad de rastrojo restante luego de la labranza; STA es la estabilidad de los agregados del suelo;

Luego se calcula el índice de impacto de la labranza (TI) que representa el riesgo de erosión del suelo debido a la implementación de esta acción con los diversos tipos de herramientas (Ecuación AI.20).

$$TI_y = \text{Mín} \left[1, - \left\{ \left(\frac{1}{\text{Mín}(T_{\text{imp}}) - \text{Max}(T_{\text{imp}})} \right) \cdot (\text{Sum}(T_{\text{imp}}) - \text{Mín}(T_{\text{imp}})) \right\} \right] \quad (\text{AI.20})$$

donde TI_y es el índice de impacto de la labranza en y ; $\text{Mín}(T_{\text{imp}})$ es el mínimo valor del impacto de labranza (para el caso en el que no se aplica ningún tipo de labranza, 0 tu); $\text{Max}(T_{\text{imp}})$ es el máximo valor de impacto aceptable (se considera igual al valor correspondiente a dos usos de la herramienta de arado de reja y vertedera, 1,84 tu) y $\text{Sum}(T_{\text{imp}})_y$ es la sumatoria del impacto en el suelo de todas las herramientas de labranza utilizadas en ese año o campaña.

Sin embargo, para determinar el índice de labranza (T_y) no sólo se debe tener en cuenta TI_y , sino también el valor intrínseco del riesgo de erosión del suelo (TR). Este factor depende de la clasificación de capacidad de uso del suelo (LCC), dato específico de cada lote y cuya relación se puede establecer según la Tabla AI.2.

Tabla AI.2: Relación de LCC con TR

LCC	Definición	TR
I	No tiene limitaciones significativas para el cultivo.	1,00
II	Adecuada para cultivos, pero tiene limitaciones.	0,50
III	Adecuada para cultivos, pero tiene limitaciones.	0,25
IV	Adecuado para cultivos, pero solo bajo prácticas seleccionadas.	0,10
V-VIII	Las clases V a VII son las más adecuadas para pastos. La clase VIII es apropiada sólo para usos no agrícolas.	0,00

Una vez definidos los índices TR y T_{ly} , se los integra por la regla de inferencia adoptada para estimar el índice de labranza (T_y). Éste último representa el daño ocasionado por año en una hectárea al implementar labranzas con diferentes herramientas como método de control de malezas (Ecuación AI.21).

$$T_y = \frac{\sum_{k=1}^n \min[\mu(x_j)]_k \cdot C_k}{\sum_{k=1}^n \min[\mu(x_j)]_k} \quad (\text{AI.21})$$

donde T_y es el índice de impacto de la labranza para el año o campaña y ; $\mu(x_j)$ es el valor de las función AI.20 y C_k son los valores de la regla de decisión del Sugeno que integra los valores extremos de la ecuación AI.20 y TR.

ANEXO II

All.1. Competencia Intraespecífica

La competencia intraespecífica se simula utilizando la función 4.1 detallada en la sección 4.2.6 (Competencia Intraespecífica). Para *E. davidii* se estableció una capacidad de porte del agroecosistema (K) de 150 individuos.m⁻² en estados reproductivo (Tabla 4.2), y factores de competencia por estado fenológico (f_s) de: 0.1, 0.5, 0.75 y 1; para los estados cotiledonar, vegetativo temprano, vegetativo avanzado y reproductivo, respectivamente. Como resultado, la densidad de individuos simulados es afectada por K y f_s únicamente al momento de pasar de un estado fenológico al otro, como se describe en los Capítulos II y IV y se aprecia en las Figuras 4.5 y 4.6 de dinámica poblacional.

A continuación, se ejemplifica el funcionamiento de la función de competencia intraespecífica de *E. davidii* mediante dos casos de estudio con infestaciones contrastantes.

All.1.1. Caso I, baja infestación de *E. davidii*

En la Figura All.1 se presentan los resultados correspondientes a la simulación de la dinámica poblacional de *E. davidii* considerando un nivel bajo de infestación inicial (Sq = 150 semillas quiescentes.m⁻²) en el banco de semillas durante la campaña 2021-2022.

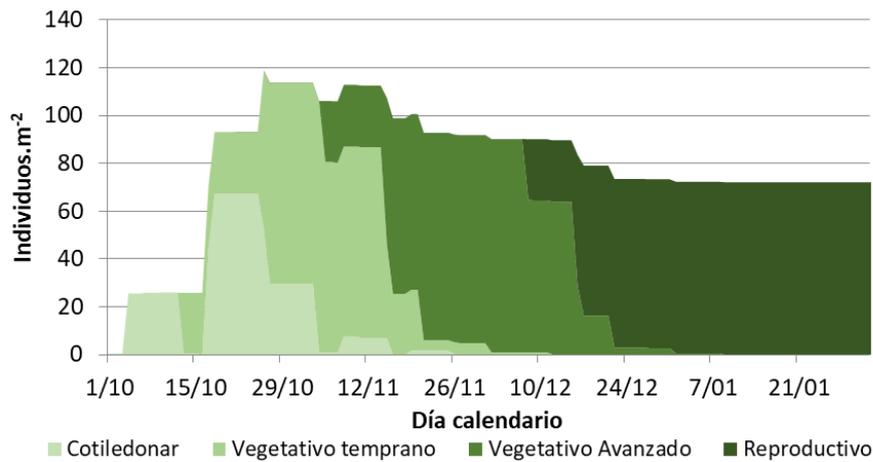


Figura AII.1. Dinámica poblacional de *E. davidii* mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una baja infestación de semillas (150 semillas quiescentes.m⁻²).

Se observa la dinámica poblacional diaria de *E. davidii* representada por el número de individuos en los distintos estados fenológicos en función del tiempo. A partir de esta figura podemos observar hasta 5 flujos de emergencia (inicios estado cotiledonar) ocurridos aproximadamente en las siguientes fechas: 5/10, 17/10 y 25/10 muy cercanos, 9/11 y 20/11. Con respecto a la competencia intraespecífica, podemos observar reducciones en la cantidad de individuos, pese a la baja infestación inicial, (150 semillas quiescentes.m⁻²), alcanzando máximos de: 67 individuos.m⁻² en estado cotiledonar el 25/10; 105 individuos.m⁻² en estado vegetativo temprano el 4/11; 89 individuos, m⁻² en estado vegetativo avanzado del 2/11 al 7/11; y 72 individuos.m⁻² en estado reproductivo, desde el 1/01 en adelante. Se concluye que de las 150 semillas.m⁻² que germinaron, solo 72 alcanzaron el estado reproductivo. Se eliminaron por competencia intraespecífica 18 individuos ingresando al estado de plántula, 21 ingresando al estado de vegetativo temprano, 21 ingresando al estado vegetativo avanzado y 18 ingresando al estado reproductivo.

All.1.2. Caso II, alta infestación de *E. davidii*

En la Figura All.2 se presentan los resultados correspondientes a la simulación de la dinámica poblacional de *E. davidii* considerando un nivel alto de infestación inicial ($S_q = 1200$ semillas quiescentes. m^{-2}) en el banco de semillas.

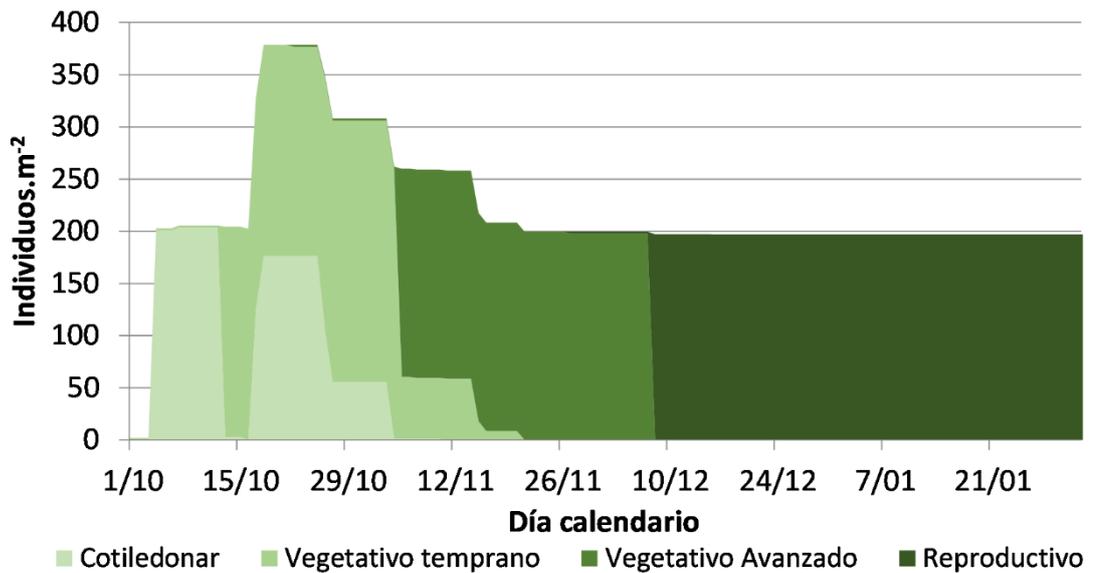


Figura All.2. Dinámica poblacional de *E. davidii* mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una infestación media de semillas (1200 semillas quiescentes. m^{-2}).

Podemos observar solo 3 de los 5 flujos de emergencia presentes en la Figura All.1 dado que la competencia intraespecífica eliminó los flujos que emergieron a partir de noviembre. Además, al comparar las figuras podemos observar que debido a la competencia, el primer flujo de emergencia logra establecer una mayor proporción de individuos con respecto del total (46% vs 25%). El segundo y tercer flujos de emergencia son mayormente afectados por la competencia intraespecífica al intentar alcanzar el estado vegetativo avanzado. Además, podemos observar que pese a multiplicarse por 8 la infestación inicial, la cantidad final de individuos en estado reproductivo no llega a triplicar las alcanzadas en el Caso I (197 vs 72 individuos. m^{-2}). Se alcanzaron máximos

de: 204 individuos.m⁻² en estado cotiledonar, entre el 7/10 y 12/10; 259 individuos.m⁻² en estado vegetativo temprano el 4/11; 200 individuos.m⁻² en estado vegetativo avanzado, durante gran parte de noviembre; y 197 individuos.m⁻² en estado reproductivo, desde el 8/12 en adelante. De las 1200 semillas que germinaron, solo 197 alcanzaron el estado reproductivo. De los individuos que se eliminaron por competencia intraespecífica, 762 lo hicieron ingresando al estado de plántula, 177 ingresando al estado de vegetativo temprano, 61 al estado vegetativo avanzado y 3 ingresando al estado reproductivo.

All.2. Carga de datos para la simulación

Para la simulación de los ensayos en la etapa de calibración y validación se cargan una serie de datos por defecto, los cuales se detallan en la Tabla All.1, e incluyen información de localización, cultivo, maleza y manejo.

Tabla AII.1. Ejemplo de los datos utilizados para la simulación de un ensayo en la etapa de calibración y validación.

Descripción	Datos	Unidades
Localidad	Azul	-
Fecha de control durante barbecho	18/10/1998	d/m/año
Tipo de control durante barbecho	Labranza	-
Cultivo	Soja	-
Grupo de madurez	4	-
Densidad de siembra	42	pl.m ⁻²
Distanciamiento entre hileras	70 cm	Cm
Fecha de siembra	13/11/1998	d/m/año
Fecha y tipo de control pre-siembra/pre-emergencia	11/11/1998 Glifosato	d/m/año -
Fecha de control post-emergencia	7/12/1998	d/m/año
Tipo de control post-emergencia	imazetapir 100 g.ha ⁻¹ (LS 10% Pivot H)	-
Método de control	Químico	-
Densidad <i>Euphorbia davidii</i>	110	individuos.m ⁻²
Estado fenológico de <i>E. davidii</i> al control	4 hojas	-
Proporción de control de <i>E. davidii</i>	0,80	-
Rendimiento Obtenido	2560	% o kg.ha ⁻¹
Rendimiento libre de malezas	2920	Kg.ha ⁻¹