

Optimization of Cropping Systems and Agricultural Rotations using a MILP Model

Agustina Anselmino¹ , Matías D. Mendez², Mariana E. Cóccola¹ 

¹ Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, FRCU, Concepción del Uruguay, Argentina

² GC Agro S.R.L., Villa San Marcial, Argentina

anselmoinoagustina@conicet.gov.ar; matias@gcagro.com.ar;
marcoccola@santafe-conicet.gov.ar

Abstract. In Argentina, the agro-industrial sector constitutes one of the country's main sources of foreign exchange, establishing itself as a fundamental pillar of its economy. However, the planning of agricultural season is typically carried out by producers without the systematic support from optimisation tools. In this context, the present study proposes a mixed-integer linear programming (MILP) model for planning multiple agricultural seasons, integrating decisions on crop selection, sowing schedules, and the allocation of production to different commercial outlets. The formulation incorporates agronomic constraints such as sowing windows, crop cycle lengths, and temporal precedence relationships between crops, thereby ensuring the feasibility of the production schedule within each plot. Furthermore, the model accounts for historical agronomic data to capture crop rotation effects on soil productivity. The objective is to maximise the economic return of the production system while promoting efficient land use. The model is applied to a representative case study in the province of Entre Ríos to illustrate its applicability and analyse the impact of planning decisions on production and economic outcomes.

Keywords: optimisation, agricultural planning, crop rotation, profitability, land use

Optimización de Cultivos y Rotaciones Agrícolas mediante un Modelo MILP

Resumen. En la Argentina, el sector agroindustrial constituye una de las principales fuentes de generación de divisas del país, consolidándose como un pilar fundamental de su economía. Sin embargo, la planificación de las campañas agrícolas suele ser realizada principalmente por los productores, sin el apoyo sistemático de herramientas de optimización. En este contexto, el presente trabajo propone un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para la planificación agrícola de un conjunto de campañas, que integra decisiones de selección

de cultivos, calendario de siembra y asignación de la producción a diferentes destinos comerciales. La formulación incorpora restricciones agronómicas, tales como ventanas de siembra, duración de los cultivos y relaciones de precedencia temporal entre cultivos, permitiendo garantizar la factibilidad del calendario agrícola dentro de cada lote. Además, el modelo considera información del historial agronómico para capturar efectos de rotación sobre la productividad del suelo. El objetivo es maximizar el beneficio económico del sistema productivo y promover un uso eficiente del suelo. El modelo se aplica a un caso de estudio representativo de la provincia de Entre Ríos para ilustrar su aplicabilidad y analizar el impacto de las decisiones de planificación sobre los resultados productivos y económicos.

Palabras clave: optimización, planificación agrícola, rotación de cultivos, rentabilidad, uso del suelo.

1 Introducción

La tierra es un recurso finito, esencial y no sustituible que enfrenta una presión sistémica sin precedentes: se estima que la agricultura mundial deberá producir un 50% más de alimentos para el año 2050 a fin de satisfacer la demanda alimentaria futura (FAO, 2025). En un contexto de crisis climática y degradación de suelos, la planificación agrícola debe dejar de ser una tarea empírica para convertirse en un problema de optimización de sistemas agroalimentarios, donde es necesario equilibrar la rentabilidad económica con la preservación de los servicios ecosistémicos (Rusdiansyah et al., 2023). Esta planificación resulta clave para gestionar la seguridad alimentaria frente a la volatilidad de los mercados globales y la incertidumbre en las cadenas de valor. En este sentido, la adopción de esquemas sostenibles de rotación de cultivos es fundamental, ya que no solo maximiza los ingresos esperados, sino que mejora la estructura del suelo y reduce la dependencia de fertilizantes y plaguicidas sintéticos, asegurando la sostenibilidad del sistema en el largo plazo (Benini et al., 2023).

En la Argentina, la actividad agrícola constituye un pilar estructural para la estabilidad macroeconómica, representando en 2024 el 18% del Valor Agregado Bruto (VAB) nacional y generando uno de cada cinco puestos de trabajo en el sector privado (Ferrari et al., 2025). En términos productivos, la actividad alcanzó un máximo histórico en enero de 2026, destacándose la mayor cosecha de trigo registrada y el área sembrada de girasol más alta del siglo. No obstante, la actividad implica también la gestión de una red compleja de cosecha, transporte y servicios, expuesta a desafíos climáticos y procesos de degradación de tierras, lo que exige una planificación integrada para mantener su competitividad y sostenibilidad en el mercado global, donde además los costos logísticos y la distancia a los mercados juegan un rol determinante (Bolsa de Comercio de Rosario, 2026).

Dado que el monocultivo es una práctica indeseable y que la expansión en hectáreas no garantiza la maximización del valor (ya que incrementa el volumen producido, pero también los costos, el riesgo y la complejidad de gestión), una alternativa más eficiente es la intensificación del uso del suelo mediante esquemas de rotación e inclusión de

cultivos de servicio, que permiten mejorar la productividad, la estabilidad del sistema y su sostenibilidad en el largo plazo (Piquer-Rodríguez et al., 2018).

En la práctica, la planificación de la campaña agrícola suele depender de la experiencia empírica de los productores o asesores técnicos, sin el apoyo de herramientas analíticas avanzadas. No obstante, diversos estudios demuestran que los modelos matemáticos pueden mejorar estas decisiones al integrar datos y variables de gran relevancia. Konstantinos (2025) introdujo una “restricción histórica” basada en 15 años de datos para garantizar la diversidad de cultivos en un modelo de programación lineal (LP) aplicado en Grecia. Por su parte, Shmygol (2025) propuso la automatización del proceso mediante matrices de rendimientos relativos que consideran la secuencia biológica de los cultivos para maximizar la productividad en un modelo de programación lineal entera (ILP) en Ucrania. Asimismo, Benini et al. (2023) cuantificaron los costos agrónomos de rotaciones no ideales en esquemas de tres cultivos, integrando incentivos de sostenibilidad en un modelo ILP aplicado a Italia. En nuestro contexto nacional, Catalá et al. (2013) desarrollaron un modelo MILP para la optimización de inversiones en la industria de pomáceas (manzanas y peras), aplicado a una granja típica del Alto Valle del Río Negro. Sin embargo, no se identificaron antecedentes publicados en Argentina en los que se desarrolle un modelo matemático para la planificación de múltiples campañas agrícolas, donde se integre una amplia variedad de cultivos, esquemas de rotaciones e historial agronómico del lote, con las adaptaciones específicas requeridas para la provincia de Entre Ríos.

A partir de estos antecedentes, el presente trabajo propone un modelo de optimización para la planificación de campañas agrícolas, que integra la asignación y el secuenciamiento de cultivos sobre lotes preestablecidos, considerando el calendario de siembra y el efecto de las rotaciones sobre los rendimientos. El modelo busca maximizar la rentabilidad y la eficiencia en el uso del suelo mediante información agronómica, económica y territorial. Para evaluar su aplicabilidad, se analiza un caso de estudio en las regiones Centro Sur y Centro Oeste de la provincia de Entre Ríos, que abarca los departamentos de Gualeguay, Gualeguaychú, Villaguay, San Salvador, Tala y Uruguay, demostrando el potencial del enfoque para apoyar la planificación de campañas agrícolas bajo criterios productivos, agronómicos, logísticos y económicos integrados.

2 Descripción del problema

El problema de planificación agrícola y rotación de cultivos abordado considera un sistema de producción compuesto por un conjunto de lotes J , en los cuales se deben asignar distintos cultivos I a lo largo del horizonte de planificación, definido por las campañas C a planificar. Se considera que cada campaña se divide en segmentos de siembra T , que representan los periodos de ocupación de un lote por un determinado cultivo. El historial de cada lote se define a partir de un conjunto de campañas pasadas CH , cuya información permite capturar efectos de rotación y antecedentes productivos sobre el rendimiento. A su vez, se establece el conjunto L para determinar el nivel de antigüedad de los cultivos sobre cada lote.

Los cultivos pueden clasificarse en distintos subconjuntos según sus características agronómicas y productivas. En particular, se distinguen en cultivos principales I^M (integrado principalmente por “cultivos de verano”) y cultivos secundarios I^S , así como un subconjunto I^* de cultivos que no deben repetirse en 2 campañas consecutivas sin la presencia de un cultivo intermedio. Además, la compatibilidad entre cultivos y condiciones edáficas se modela mediante el subconjunto I_s , que indica qué cultivos pueden desarrollarse en cada tipo de suelo $s \in S$. También los lotes se agrupan en subconjuntos J_s según el tipo de suelo que los caracteriza.

Cada lote $j \in J$ posee una superficie determinada, y debe ser asignado a un único uso en cada segmento de siembra $t \in T$, pudiendo incluirse el barbecho como una alternativa válida para representar los períodos sin producción. La planificación debe respetar ventanas de siembra específicas para cada cultivo, definidas por parámetros que indican el inicio y fin del periodo óptimo de implantación, así como la duración del cultivo desde la siembra hasta la cosecha.

Un aspecto central del problema es el secuenciamiento de cultivos a través del tiempo dentro de cada lote j . Las decisiones de siembra y cosecha están vinculadas mediante restricciones temporales que aseguran la factibilidad operativa, considerando tanto el tiempo de crecimiento de cada cultivo como los tiempos de preparación entre cultivos consecutivos. Estos tiempos pueden variar dependiendo de la secuencia utilizada, permitiendo superposiciones parciales (por ejemplo, en cultivos forrajeros).

Asimismo, se incorporan restricciones agronómicas que limitan determinadas secuencias de cultivos debido a su impacto negativo sobre el suelo, así como condiciones que evitan la repetición frecuente de ciertos cultivos sin rotaciones adecuadas. En este sentido, se modela la historia productiva de cada lote j mediante variables que registran los cultivos implantados en campañas anteriores, tanto dentro del horizonte de planificación como en períodos previos.

El rendimiento de cada cultivo en un lote y periodo determinado depende no solo de las condiciones del suelo y del área disponible, sino también de los antecedentes de uso del lote, ajustando el rendimiento promedio esperado en función de la secuencia histórica de cultivos, considerando impactos positivos o negativos derivados de la rotación.

En principio, el problema busca maximizar el beneficio económico total, definido como la diferencia entre los ingresos por venta de la producción y los distintos costos asociados, incluyendo costos de siembra, cosecha, arrendamiento y postcosecha. Estos últimos incluyen el acondicionamiento, transporte y comisiones comerciales. Como segunda función objetivo, se plantea la maximización del uso del suelo, medido en términos de días de ocupación efectiva de los lotes a lo largo del horizonte de planificación.

La solución del problema permite determinar, para cada lote y cada periodo de siembra, lo siguiente:

- i. Qué cultivo implantar.
- ii. En qué momento realizar la siembra y la cosecha.
- iii. Qué nivel de producción se obtiene.
- iv. Cómo impactan las decisiones de rotación sobre los rendimientos.

En consecuencia, se obtiene una planificación integral que equilibra criterios económicos y agronómicos, asegurando la sostenibilidad productiva del sistema.

3 Formulación matemática

El problema se representa matemáticamente mediante un modelo de programación lineal entera mixta (MILP). Si bien, en principio, el problema se formula como un problema de optimización de objetivo único, se consideran dos funciones objetivo para su resolución. A continuación, se describen todas las restricciones asociadas a la formulación matemática.

Funciones objetivo. La función objetivo (1) se define para maximizar el beneficio del productor agrícola $Profit[USD]$, mientras que la función objetivo (2) busca intensificar el uso del suelo $ILU [días]$. La ganancia neta del productor se calcula como los ingresos obtenidos a partir de la venta de la producción total, menos los costos operativos, incluyendo el costo de siembra, de cosecha, de arrendamiento y de la postcosecha. Por otra parte, el índice de uso del suelo se obtiene a partir del tiempo de ocupación del lote por cada cultivo sembrado. La variable binaria $X_{i,j,t}$ determina si el cultivo i se establece en el lote j durante el segmento de siembra t , mientras que el parámetro gt_i define el periodo de crecimiento de un cultivo desde la siembra hasta la cosecha.

$$\max Profit[USD] = Revenues - sowingCost - harvestCost - rentalCost - postHarvestCost \quad (1)$$

$$\max ILU [días] = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} gt_i \times X_{i,j,t} \quad (2)$$

Las restricciones (3) – (7) establecen los términos que definen la función objetivo (1).

$$Revenues = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_c} fsp_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right] \times Y_{i,j,t}[ton] \quad (3)$$

$$SowingCost = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_c} sc_{i,c} \left[\frac{USD}{ha} \right] \times ha_j[ha] \times X_{i,j,t} \quad (4)$$

$$HarvestCost = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_c} hc_{i,c} \left[\frac{USD}{ha} \right] \times ha_j[ha] \times X_{i,j,t} \quad (5)$$

$$RentalCost = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_c} \left(frc_{i,j,c} \left[\frac{USD}{ha} \right] \times ha_j[ha] \times X_{i,j,t} + fsp_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right] \times vr_{i,j,c}[\%] \times Y_{i,j,t}[ton] \right) \quad (6)$$

PostHarvestCost

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_c} \left[tf_i[\%] \times fsp_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right] \times Y_{i,j,t}[ton] \right. \\
&\quad + scp_i[\%] \times cp_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right] \times Y_{i,j,t}[ton] \\
&\quad + \left(st_i[\%] \times cst_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right] + (1 - st_i[\%]) \times clt_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right] \right) \\
&\quad \left. \times Y_{i,j,t}[ton] \right] \tag{7}
\end{aligned}$$

Los ingresos brutos surgen del producto entre el rendimiento esperado $Y_{i,j,t}[ton]$ y el precio de venta al momento de la cosecha $fsp_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right]$. Los costos de siembra se determinan a partir del parámetro $sc_{i,c} \left[\frac{USD}{ha} \right]$, el cual incluye los costos de insumos, costos de labores y costos fijos de estructura, que son dependientes de cada cultivo i y de la campaña c a planificar. Dicho costo multiplicado por la superficie del lote $ha_j[ha]$ determina el costo total de siembra del cultivo i en el lote j durante la campaña c . De forma similar, los costos de cosecha se calculan a partir de la multiplicación entre la superficie del lote $ha_j[ha]$ y el costo unitario $hc_{i,c} \left[\frac{USD}{ha} \right]$. Por otra parte, los costos de arrendamiento tienen la particularidad de contener un componente fijo y un componente variable, dado que pueden existir una gran variedad de contratos de arrendamiento. El componente fijo se calcula en función al costo fijo de arrendamiento $frc_{i,j,c} \left[\frac{USD}{ha} \right]$ y la superficie del lote $ha_j[ha]$, mientras que el componente variable representa un porcentaje de los ingresos obtenidos, indicado por el parámetro $vr_{i,j,c}[\%]$. Finalmente, el costo de postcosecha se compone de una tarifa de transacción $tf_i[\%]$ que dependerá de los ingresos, de un costo de acondicionamiento $cp_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right]$ según la proporción $scp_i[\%]$ que se deba acondicionar, y de los costos de transporte, que dependerán del porcentaje de la producción $st_i[\%]$ que es embolsada en campo o enviada a un destino cercano, con costo unitario $cst_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right]$. Se asume que el porcentaje restante de la producción se comercializa en centros más alejados, por ejemplo, puertos, con costo unitario $clt_{i,c} \left[\frac{USD}{ton} \right]$.

Restricciones de asignación. En un determinado segmento de siembra t , existe un único cultivo i en un lote j , tal como lo indica la restricción (8). A fines prácticos, el barbecho se considera un tipo de cultivo, y permite contemplar aquellos casos donde el suelo queda desocupado por un periodo de tiempo prolongado. A fines de mejorar la eficiencia computacional del modelo, para todo cultivo $i \notin I_s$ y lote $j \in J_s$, la variable $X_{i,j,t}$ se fija en cero, evitando las asignaciones entre cultivos y tipos de suelo incompatibles.

$$\sum_{i \in I} X_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (8)$$

Restricciones de viabilidad temporal. Cada cultivo i tiene asociada una ventana de siembra $[st_i^{start}, st_i^{end}]$ las cuales indican la fecha oportuna en la que se siembra un determinado cultivo, siendo el día de inicio de siembra st_i^{start} y el día final de la ventana de siembra st_i^{end} . Al definir una campaña agrícola $c \in C$ se considera un periodo que comienza el 1 de junio y termina el 31 de mayo del año siguiente. La variable $ST_{i,j,t}$ determina la fecha exacta de siembra del cultivo i , en el lote j , periodo t , a través de la restricción (9). Existen cultivos llamados de “pre-campaña” cuya ventana de siembra pueda ser anterior al inicio de cada campaña agrícola, y para los cuales los parámetros $[st_i^{start}, st_i^{end}]$ toman valores negativos. En consecuencia, la variable $ST_{i,j,t}$ también puede tomar valores negativos para aquellos segmentos de siembra $t \in T_c$ que pertenecen a la primera campaña a planificar, es decir $c=1$. En la restricción (9), la expresión $ord(c)$ determina el orden del elemento $c \in C$ dentro del conjunto respectivo.

$$\begin{aligned} st_i^{start} + 365 \times (ord(c) - 1) &\leq ST_{i,j,t} & \forall i \in I, j \in J, t \in T, c \\ &\leq st_i^{end} + 365 \times (ord(c) - 1) & \in C: t \in T_c \end{aligned} \quad (9)$$

Por otra parte, el periodo de crecimiento del cultivo, desde su siembra hasta su cosecha, se define a través del parámetro gt_i (días). A partir de la fecha de siembra $ST_{i,j,t}$ y el periodo de crecimiento gt_i se puede obtener la fecha de cosecha del cultivo i , en el lote j , periodo t , indicada con la variable $HT_{i,j,t}$, tal como se observa en la restricción (10). Para el caso del barbecho se considera: $st_i^{start} = 0$; $st_i^{end} = 365$; $gt_i = 0$, dado que puede realizarse en cualquier momento de la campaña.

$$HT_{i,j,t} \geq ST_{i,j,t} + gt_i \times X_{i,j,t} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (10)$$

Restricciones de secuenciamiento de cultivos. La restricción (11) asegura que, dentro de cada lote, un determinado cultivo i no pueda sembrarse antes de la fecha de cosecha del cultivo anterior i' , considerando además el tiempo que implica acondicionar el lote para el cambio entre cultivos, definido por el parámetro $setup_{i,i'}$. Dicho parámetro puede tomar valores negativos cuando el cultivo i puede sembrarse con antelación (por ejemplo, mediante el uso de aviones o drones), incluso antes de la cosecha del cultivo i' . En el caso del barbecho, se considera $setup_{i,i'} = 0$ para cualquier cultivo.

$$\begin{aligned} ST_{i,j,t} &\geq HT_{i',j,t'} + setup_{i,i'} - M & \forall (i, i') \in I, j \\ &\quad * (2 - X_{i,j,t} - X_{i',j,t'}) & \in J, (t, t') \in T: t' < t \end{aligned} \quad (11)$$

La restricción (12) evita utilizar secuencias de cultivos que puedan provocar impacto negativo en el suelo. El parámetro $ar_{i,i'}$ vale 1 cuando el cultivo i' puede sembrarse a

continuación del cultivo i , caso contrario vale 0. El barbecho es compatible con todos los cultivos ($ar_{i,i'} = 1$).

$$X_{i',j,t-1} + X_{i',j,t} \leq 1 + ar_{i,i'} \quad \forall (i, i') \in I, j \in J, t \in T: t > 1 \quad (12)$$

Las restricciones (13a) y (13b) evitan repetir un mismo cultivo $i \in I^*$ en 2 campañas consecutivas sin utilizar otro cultivo intermedio. La restricción (13b) se define específicamente para la primera campaña dentro del horizonte de planificación, ya que en ese caso hay que recurrir a la historia de cada lote. El parámetro $xh_{i,j,ch}$ indica si el cultivo i fue sembrado en el lote j en la campaña anterior inmediata $ch1$. Se excluye de dichas restricciones al barbecho por no poseer la limitación mencionada.

$$\begin{aligned} X_{i,j,t} + X_{i,j,t'} & \quad \forall i \in I^*, j \\ & \leq 1 + \sum_{t'' \in T: t < t'' < t'} \sum_{i' \in I: i' \neq i \text{ \& } i' \neq \text{barbecho}} X_{i',j,t''} \quad \begin{aligned} & \in J, (t, t') \in T: t \\ & < t' \end{aligned} \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} xh_{i,j,ch1} + X_{i,j,t} & \quad \forall i \in I^*, j \in J, c \\ & \leq 1 + \sum_{t' \in T_c: t' < t} \sum_{i' \in I: i' \neq i \text{ \& } i' \neq \text{barbecho}} X_{i',j,t'} \quad \begin{aligned} & \in C, t \in T_c: c = 1 \end{aligned} \\ & + \sum_{i' \in I: i' \neq i \text{ \& } i' \neq \text{barbecho}} xh_{i',j,ch1} \end{aligned} \quad (13b)$$

Restricciones de producción y rendimientos. Las restricciones (14) y (15) definen la máxima cantidad de cultivos principales I^M y secundarios I^S a considerar en la planificación agrícola dentro de cada lote $j \in J$.

$$\sum_{i \in I^M} \sum_{t \in T} X_{i,j,t} \leq \max_j^M \quad \forall j \in J \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I^S} \sum_{t \in T} X_{i,j,t} \leq \max_j^S \quad \forall j \in J \quad (15)$$

Las restricciones (16) y (17) determinan que, la producción obtenida de cultivo i en el lote j durante el periodo t , depende de la superficie del lote, del rendimiento promedio del cultivo i en el suelo s (representado por el parámetro $yield_{i,s}^{av}$) y de la historia productiva del lote, efecto capturado mediante la variable $Z_{i,j,t}$. Específicamente, la restricción (16) vincula la producción con el rendimiento ajustado por efectos históricos, mientras que la restricción (17) asegura que la producción solo pueda tener lugar si el cultivo i es efectivamente sembrado en el lote j .

$$Y_{i,j,t} \leq yield_{i,s}^{av} \times ha_j \times Z_{i,j,t} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S, t \in T: j \in J_s \quad (16)$$

$$Y_{i,j,t} \leq yield_{i,s}^{av} \times ha_j \times X_{i,j,t} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S, t \in T: j \in J_s \quad (17)$$

El valor de la variable de ajuste $Z_{i,j,t}$ se determina a partir de la restricción (18), la cual incorpora el impacto de los cultivos de las tres campañas anteriores sobre el cultivo actual.

$$Z_{i,j,t} = 1 + \sum_{l \in L: l \leq 3} \sum_{i' \in I} \alpha_l \times red_{i',i} \times H_{i',j,t,l} \quad \forall (i, i') \in I, j \in J, t \in T \quad (18)$$

La variable binaria $H_{i',j,t,l}$ registra la historia del lote, indicando que el cultivo i' se implantó en el lote j con un periodo de antigüedad de l años respecto al periodo t . El nivel de antigüedad se define tanto para periodos dentro de una misma campaña ($l = 0$) como para periodos de campañas anteriores ($l = 0, 1, 2, 3, \dots, l_{max}$), siendo $l_{max} = \#C + \#CH$. El parámetro $red_{i',i}$ cuantifica el impacto sobre el rendimiento asociado a sembrar el cultivo i' previo al cultivo i , mientras que α_l representa el factor de ponderación por antigüedad, asignando un mayor valor aquellas campañas que sean más recientes. Finalmente, las restricciones (19) y (20) definen el valor de la variable $H_{i,j,t,l}$. En particular, la restricción (20) permite incorporar la historia previa al horizonte de planificación, a partir del parámetro binario $xh_{i,j,ch}$, que indica si el cultivo i fue sembrado en el lote j en la campaña histórica ch .

$$H_{i,j,t,l} = \sum_{t' \in T_c: t' \leq t} X_{i,j,t'} \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, (c, c'), t \in T_c: (c' \leq c) \& l \quad (19)$$

$$= ord(c) - ord(c')$$

$$H_{i,j,t,l} = xh_{i,j,ch} \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, c \in C, ch \in CH, t \in T_c: l \quad (20)$$

$$= ord(c) + ord(ch) - 1$$

En conjunto, las restricciones (19) y (20) permiten construir una representación completa de la historia del lote, combinando decisiones endógenas del modelo con información histórica de campañas previas.

4 Caso de estudio y resultados

Como forma de evaluar el modelo propuesto, se plantea un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos, con especial énfasis en la zona Centro Sur y Centro Oeste, que abarca los departamentos de Gualaguay, Gualaguaychú, Villaguay, San Salvador, Tala y Uruguay. Entre Ríos se caracteriza por la predominancia de suelos tipo Vertisol en gran parte de su territorio, los cuales presentan rendimientos promedio de cultivos inferiores en comparación con otros tipos de suelos, como Molisoles o Alfisoles, característicos de la región pampeana. En esta región, los cultivos de verano más representativos incluyen girasol, sorgo, maíz (en sus distintas fechas de siembra), soja y sus variantes de segunda. Por su parte, los cultivos de invierno comprenden colza, carinata, camelina, cebada, centeno, arveja, avena, rye grass y vicia, pudiendo estos últimos tres

utilizarse además como cultivos de servicio (CS), con el objetivo de mantener la cobertura del lote. A los fines de este modelo, se consideran los cultivos de verano como cultivos principales, mientras que los cultivos de invierno y de servicio se incluyen como cultivos secundarios. Las ventanas de siembra y la duración del ciclo entre siembra y cosecha de cada cultivo se detallan en la Tabla 1. Se asume que una campaña agrícola comienza el 01/06 y termina el 31/05 del año siguiente.

Tabla. 1. Características de los cultivos y ventana de siembra

Cultivo	Duración del ciclo (días)	Ventana de Siembra (día de la campaña)	
		Comienzo	Fin
Colza	213	-60	0
Carinata	213	-60	0
Avena	183	-30	30
R. Grass	183	-60	30
Trigo	183	-30	45
Camelina	122	-30	30
Cebada	152	1	61
Centeno	152	1	61
Arveja	152	1	92
Girasol	183	71	122
Sorgo	183	107	168
Maíz	183	76	107
Soja	152	132	183
Soja II	152	173	229
Maíz II	183	173	229
Maíz Tardío	183	173	229
Avena CS	213	-60	61
R. Grass CS	213	-60	61
Vicia	213	-77	-16
Barbecho	0	1	365

Para el caso a resolver, se considera la planificación de 3 campañas agrícolas sobre 7 lotes, todos con suelo de tipo Vertisol, cuyos tamaños se establecen en la Tabla 2. Dicha tabla también muestra la historia de cada lote en las 3 campañas previas al periodo de planificación. Para cada campaña, se establecen 3 periodos de siembra, es decir que como máximo se pueden desarrollar hasta 3 cultivos en cada lote por campaña.

Tabla. 2. Características de los lotes e historial agronómico

Lote	Superficie (ha)	Cultivos realizados en campañas pasadas		
		CH1	CH2	CH3
J1	50	Trigo - Soja	Maíz	Avena CS - Soja
J2	87	Soja	Vicia - Maíz II	Soja
J3	47	Avena - Soja II	Girasol	Trigo - Soja II
J4	36	Maíz	Colza - Soja II	Trigo - Soja II
J5	47	Sorgo	Soja	Maíz
J6	57	Trigo - Soja II	Trigo - Soja II	Trigo - Soja II
J7	37	Soja	Soja	Soja

Los costos operativos asociados a las operaciones de siembra, cosecha, postcosecha y arrendamiento fueron provistos por la empresa GC AGRO S.R.L. Los rendimientos promedios en la zona estudiada son publicados periódicamente por la Bolsa de Comercio de Entre Ríos. El algoritmo de optimización fue desarrollado en Python utilizando la librería Pyomo y GUROBI como resolvidor MIP. El problema tiene 8.407 variables (5.040 binarias y 3.367 continuas) y 67.746 ecuaciones. La solución óptima implica 1,75 s, considerando un gap del 0%. En una primera etapa, el caso de estudio se resolvió considerando cada función objetivo de manera independiente, lo que permitió validar el modelo y analizar en detalle el impacto de cada criterio. La integración simultánea de múltiples objetivos introduce una mayor complejidad, asociada al análisis de compromisos entre soluciones. Por ello, se plantea como trabajo futuro la formulación de un modelo multiobjetivo que permita abordar dichos aspectos de manera conjunta. Cuando el problema de planificación descripto se optimiza en términos de rentabilidad (FO1), se obtiene la solución que se ilustra en las Figuras 1 y 2.

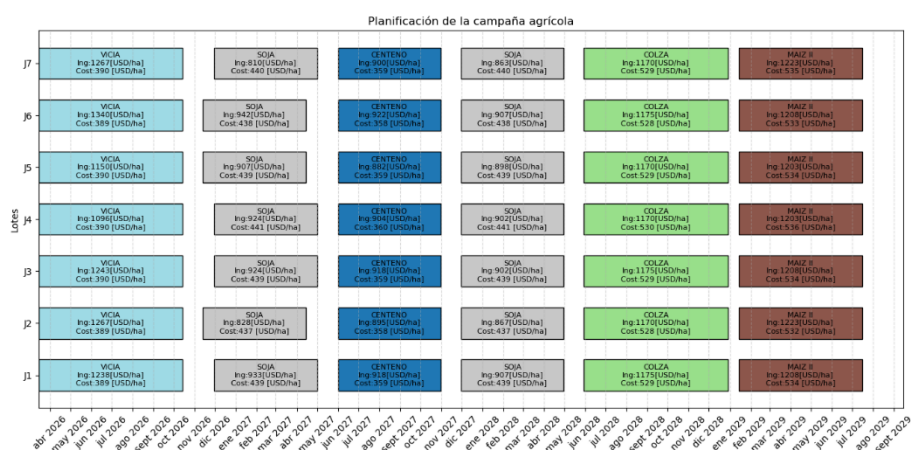


Fig. 1. Asignación y secuenciamiento óptimo de cultivos según criterio de rentabilidad.

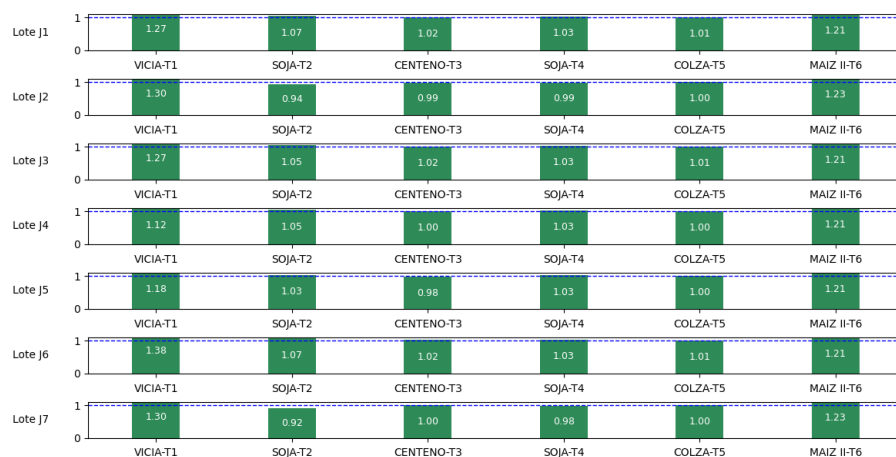


Fig. 2. Impacto de la rotación en el rendimiento de los cultivos establecidos en el plan de la Figura 1.

En términos económicos, la solución óptima del problema selecciona la misma secuencia de cultivos para cada lote, priorizando aquellos con mayor margen de ganancia, definido como la diferencia entre el ingreso bruto y los costos operativos asociados a la producción y comercialización. Este resultado se explica principalmente por la definición preliminar de la matriz de impacto del secuenciamiento de cultivos sobre el rendimiento, la cual requiere una calibración detallada por parte de profesionales agrónomos y se encuentra actualmente en desarrollo. En la Figura 2 se presenta la ganancia o pérdida porcentual en el rendimiento promedio, en función del historial agronómico de cada lote y de la matriz de rendimiento adoptada para la resolución del caso de estudio. Por ejemplo, la implantación de vicia posterior a soja genera un impacto positivo en el rendimiento final cercano al 20%, mientras que dicho impacto se reduce a aproximadamente un 5% cuando la vicia se implanta luego de trigo. En este sentido, el lote J6, que registra la secuencia trigo-soja en las tres campañas previas (ver Tabla 2), presenta un incremento en el rendimiento esperado cercano al 40% en la primera campaña considerada dentro del horizonte de planificación.

Para el caso de la función objetivo 2, orientada a intensificar el uso del suelo, la solución óptima reportada por el modelo se presenta en las Figuras 3 y 4. Como puede observarse, se incorporan en la planificación cultivos de servicio que, si bien no generan beneficios económicos directos, contribuyen a mejorar el índice de uso del suelo. Esto se debe a que los cultivos de servicio permiten reducir los períodos de barbecho, aumentando la cobertura y ocupación del suelo a lo largo del tiempo, lo que se traduce en una mayor intensidad de uso del sistema productivo. Asimismo, en el gráfico de rendimientos se observan algunas mermas en el rendimiento esperado, asociadas a la secuencia de cultivos seleccionada para cada lote.

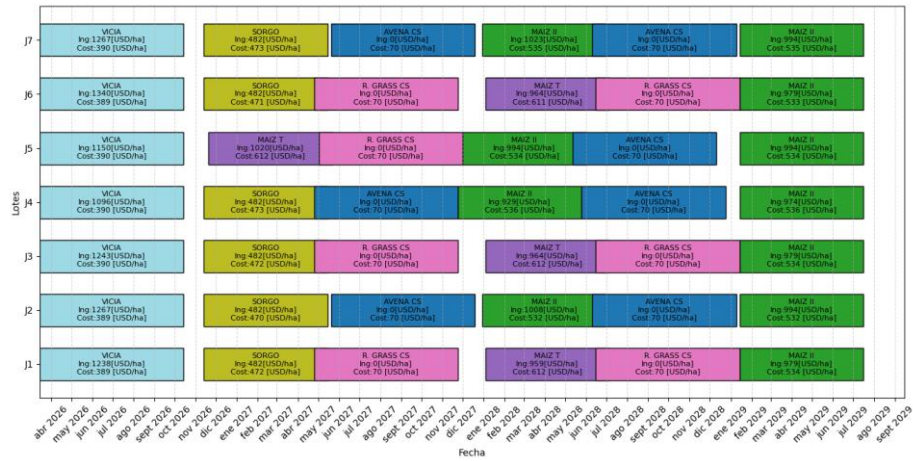


Fig. 3. Asignación y secuenciamiento óptimo de cultivos según criterio de intensificación de uso del suelo.

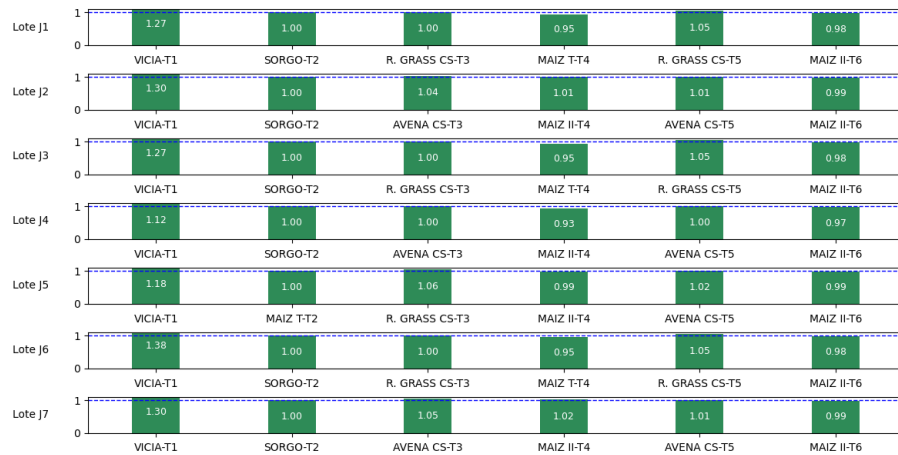


Fig. 4. Impacto de la rotación en el rendimiento de los cultivos establecidos en el plan de la Figura 3.

5 Conclusión

Este trabajo ha presentado un modelo matemático de tipo MILP para la planificación de campañas agrícolas, considerando el historial agronómico de cada lote y el impacto de las rotaciones sobre el rendimiento de los cultivos. El problema se formula como un problema de optimización de objetivo único, en el que se consideran dos funciones objetivo para su resolución: por un lado, maximizar el beneficio económico del sistema productivo y, por otro, promover un uso eficiente del suelo.

La consideración simultánea de múltiples objetivos introduce desafíos adicionales, como la definición de criterios de ponderación o la exploración del frente de Pareto, incrementando la complejidad del problema. No obstante, el enfoque adoptado sienta las bases para futuras extensiones hacia la optimización multiobjetivo, para integrar los distintos criterios analizados y sus compromisos. Además, futuros trabajos podrían incorporar análisis de sensibilidad sobre parámetros críticos, como rendimientos, precios y costos de producción, para evaluar la robustez de las soluciones. De forma complementaria, la incorporación de indicadores ambientales para evaluar el impacto de las soluciones óptimas halladas permitiría avanzar hacia una planificación agrícola más integral y sostenible.

Referencias

- Benini, M., Blasi, E., Detti, P., & Fosci, L. (2023). Solving crop planning and rotation problems in a sustainable agriculture perspective. *Computers & Operations Research*, 159, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106316>
- Bolsa de Comercio de Rosario. (2026, 24 de febrero). *La actividad agropecuaria alcanzó un nuevo máximo en enero* (IACA-BCR, Publicación N.º 4, Año 1). Bolsa de Comercio de Rosario.
- Catalá, L. P., Durand, G. A., Blanco, A. M., & Bandoni, J. A. (2013). Mathematical model for strategic planning optimization in the pome fruit industry. *Agricultural Systems*, 115, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.09.010>
- FAO. 2025. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura 2025: El potencial para producir más y mejor*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cd7488es>
- Ferrari, B., Rodríguez Zurro, T., D'Angelo, G., & Terré, E. (2025, 19 de diciembre). ¿Qué aporta el agro a la economía argentina? *Informativo semanal de mercados* (Año XLIV, Edición N.º 2225, pp. 2–11). Bolsa de Comercio de Rosario.
- Konstantinos, F. (2025). Enhancing crop strategies with linear programming: Leveraging historical constraint for optimal decision-making. *Operations Research Forum*, 6, 185. <https://doi.org/10.1007/s43069-025-00583-1>
- Piquer-Rodríguez, M., Baumann, M., Butsic, V., Gasparri, H. I., Gavier-Pizarro, G., Volante, J. N., Müller, D., & Kuemmerle, T. (2018). The potential impact of economic policies on future land-use conversions in Argentina. *Land Use Policy*, 79, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.039>
- Rusdiansyah, A., Malano, S. N., Isnaini, F., & Dewi, R. S. (2023). Optimization model of crop planning considering crop rotation with adjacency plots and nutrient cycling. *Agriculture and Natural Resources*, 57(4), 569–578. <https://doi.org/10.34044/j.an-res.2023.57.4.02>
- Shmygol, N. (2025). Optimization of agricultural enterprises' sown areas considering crop rotation. *Resources*, 14(3), 40. <https://doi.org/10.3390/resources14030040>