

## CAPÍTULO 7

### Evaluación ex-ante de alternativas productivas para el partido de Pergamino, Buenos Aires

*Bitar, M.V.<sup>28</sup>; Cabrini, S.M.<sup>29</sup>*

#### Resumen

Los modelos de decisiones multicriterio son herramientas formales en la búsqueda de agroecosistemas sostenibles. Este enfoque es consistente con la noción de multifuncional de la agricultura ya que permite evaluar el desempeño de formas alternativas de producción, considerando varios atributos económicos, sociales y ambientales. Este capítulo presenta una aplicación del método multicriterio discreto PROMETHEE para la evaluación ex-ante de sistemas alternativos para la producción agropecuaria en el partido de Pergamino, norte de Buenos Aires, zona núcleo agrícola de Argentina. Se analizan cuatro alternativas productivas: 1. monocultivo de soja, como referencia de los sistemas simplificados presentes en la zona, 2. rotación agrícola con alta proporción del suelo cubierto durante el período invernal con doble cultivos/cultivos de cobertura, 3. sistema mixto con una rotación agrícola – ganadera y 4. sistema de producción orgánica. Se comparan los cuatro sistemas en términos de un conjunto de atributos.

---

28 Becaria investigadora en UNNOBA. Contacto: [bitar.maria@inta.gob.ar](mailto:bitar.maria@inta.gob.ar)

29 Investigadora Estación Experimental Agropecuaria Pergamino Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Docente UNNOBA. Contacto: [cabrini.silvina@inta.gob.ar](mailto:cabrini.silvina@inta.gob.ar)

## Introducción

Los crecientes reclamos por una transformación de los sistemas agropecuarios actuales se basan en la aspiración de que estos sistemas generen suficiente alimento de calidad al que puedan acceder todas las personas, con bajo impacto sobre el medio ambiente, realizando contribuciones positivas sociales y culturales (Pretty *et al.*, 2018). El enfoque de intensificación sustentable propone explorar las sinergias entre producción y sustentabilidad. La intensificación sustentable se define como el incremento de la producción a partir de los mismos recursos, al tiempo que se reducen los efectos negativos para el medio ambiente y se aumenta la contribución al capital natural y el flujo de servicios ambientales (Godfray *et al.*, 2010; FAO, 2011; Pretty *et al.*, 2011).

Los sistemas productivos actuales son fundamentalmente cuestionados a nivel mundial por los impactos ambientales que causan. Estos impactos incluyen principalmente la pérdida de la capacidad productiva de los suelos, la pérdida de biodiversidad, las emisiones de gases de efecto invernadero, los desbalances de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno), y los riesgos de contaminación por pesticidas (Pretty *et al.*, 2018; Rockstrom *et al.*, 2017). Las propuestas de transformación para disminuir estos efectos negativos, aumentando el valor de la producción son de sumo interés para toda la sociedad.

## La intensificación sustentable en la región pampeana argentina

Las condiciones favorables de suelo y clima para el crecimiento de los cultivos y la predisposición de los productores para incorporar nuevas tecnologías hacen que la región Pampeana Argentina sea una de las más importantes del mundo para la producción de alimentos. Adoptar trayectorias de intensificación sustentable aparece como un objetivo ineludible en particular en países como Argentina, en los que el sector agroindustrial es un componente clave de la actividad económica y participante importante del comercio internacional.

En la región pampeana, desde la década del '80, se ha dado una rápida expansión de la agricultura, con un importante avance de la soja sobre el resto de los cultivos (Viggliuzzo, 2011; Satorre, 2005). Actualmente, la soja es el principal cultivo en las rotaciones o el único que prevalece en monocultivo. Si bien los productores eligen el cultivo de soja por su simplicidad de manejo y la alta tasa de retorno económico, existe una preocupación creciente sobre las consecuencias negativas del monocultivo de soja, como el deterioro de los suelos y el aumento de las malezas resistentes a herbicidas. Estas son algunas de las razones que promovieron el interés por intensificar y diversificar las rotaciones de cultivos, tanto de parte de los productores como desde los ambientes académicos (Caviglia y Andrade, 2010; Andrade *et al.*, 2017). Los cambios en el uso de la tierra y la combinación de actividades en busca de complementariedad y sinergias aparecen como aspectos claves en las propuestas de intensificación sostenible para la región pampeana.

Las secuencias de cultivos más diversas y con niveles de uso de los recursos naturales más intensivos se proponen para mitigar las preocupaciones ambientales relacionadas con la simplificación agrícola y los monocultivos. Las publicaciones recientes se centran en los impactos agronómicos de aumentar la frecuencia de cultivos dobles (Andrade *et al.*, 2015, 2017). Estos estudios hacen énfasis en la eficiencia del uso del agua y la energía. Los resultados respaldan la idea de que es posible mejorar el rendimiento de la producción agrícola mediante

la implementación de sistemas de producción más intensivos y diversos (Caviglia *et al.*, 2004; Caviglia y Andrade, 2010).

Asimismo, en los últimos años, fue creciendo el interés por el uso de especies de ciclo otoño-invernal como cultivos de cobertura (e.g., Pinto *et al.*, 2017). Se reportaron beneficios de la inclusión de cultivos de cobertura en las rotaciones como el aumento del contenido de materia orgánica y mejora de la estructura del suelo (Restovich *et al.*, 2011; Rimski-Korsakov *et al.*, 2015). También se ha demostrado que incluir cultivos de cobertura en las rotaciones reduce el nitrógeno potencialmente lixiviable a través de su absorción e inmovilización en la biomasa de los cultivos y en la materia orgánica lábil, aumentando la disponibilidad de este nutriente para los cultivos de cosecha en años siguientes (Constantin *et al.*, 2010; Restovich *et al.*, 2012). La mayoría de los estudios no encuentran cambios significativos en el mediano plazo en los rendimientos de los cultivos de verano asociados con la inclusión de cultivo de cobertura en la zona húmeda (Rimski-Korsakov *et al.*, 2015).

La posibilidad de diseñar sistemas que permitan reconectar la agricultura y ganadería es otro punto de creciente interés. La rotación entre cultivos de grano y las actividades ganaderas, cuando se compara con la agricultura continua, se asocia con un menor uso de agroquímicos, mayores aportes de carbono orgánico al suelo, una mejor protección del suelo contra la erosión, un ciclo de nutrientes más eficiente y protección de la biodiversidad (Cabrini *et al.*, 2016, Franzluebbbers *et al.*, 2014; Peyraud *et al.*, 2014). Sin embargo, la mayor complejidad en el manejo y el menor retorno económico de los sistemas mixtos parecen limitar la incorporación de la ganadería en las rotaciones.

Dado el creciente interés por disminuir o evitar completamente el uso de insumos químicos, la producción orgánica aparece también como una alternativa. La certificación orgánica es hoy en día la etiqueta ecológica dominante a nivel mundial. Los sistemas de producción orgánica se abstienen de usar fertilizantes sintéticos, pesticidas y Organismos Genéticamente Modificados (OGM), promueven la rotación de cultivos, la conservación de la fertilidad del suelo y los ciclos cerrados de nutrientes. Hay algunos críticos de la agricultura orgánica como un enfoque ineficiente de la producción de alimentos y, bajo este punto de vista, se espera que se vuelva menos relevante ante una demanda creciente de alimentos. Sin embargo, el número de establecimientos orgánicos y el tamaño del mercado de alimentos orgánicos han aumentado constantemente, junto con la inversión en investigación y educación en este campo (Reganold y Wachter, 2016). Los alimentos orgánicos a menudo se perciben como más nutritivos, de mejor sabor y más sensibles al bienestar animal y al medio ambiente, en comparación con los alimentos producidos convencionalmente (Mukherjee *et al.*, 2020).

Diversificar los sistemas productivos y modificar los planteos técnicos en busca de mejorar la performance ambiental implica incorporar nuevas actividades y realizar cambios en prácticas de manejo tanto productivas como comerciales. Estas transformaciones tienen efectos en los resultados económicos, el nivel de riesgo de los negocios y en la complejidad de la gestión. Estos aspectos son esenciales en el análisis de la viabilidad de las alternativas productivas.

Si bien actualmente existe preocupación sobre el modelo de producción predominante en la región pampeana argentina, son muy pocos los estudios que buscan analizar alternativas productivas desde un enfoque multicriterio que incluya aspectos económicos, ambientales y sociales. Las partes interesadas (agricultores, ambientalistas, consumidores y gobierno) tienen puntos de vista contradictorios con respecto a la definición del sistema de producción más adecuado, ya que asignan diferentes valores a los impactos económicos, sociales y ambientales

de la agricultura. Se necesita un proceso de negociación donde cada parte debe expresar sus objetivos claramente, basándose en mediciones objetivas de los impactos ambientales relevantes.

En el análisis de la heterogeneidad de los sistemas de producción agrícola elegidos por los agricultores, la teoría de la utilidad basada en múltiples atributos (Berkhout *et al.*, 2011) es un enfoque adecuado, ya que permite considerar los diferentes objetivos de los agricultores y la importancia que tienen asignar a cada uno de ellos. El supuesto básico que subyace a esta teoría es que el tomador de decisiones elige la alternativa que produce la mayor utilidad considerando múltiples criterios de todas las alternativas. Los modelos de decisiones multicriterio son herramientas formales en la búsqueda de agroecosistemas sostenibles (Berge *et al.*, 2000; Cabrini y Calcaterra, 2016). Este enfoque es consistente con la noción de multifuncional de la agricultura ya que permite evaluar el desempeño de los sistemas agrícolas, considerando varios atributos económicos, sociales y ambientales al mismo tiempo (Sadok *et al.*, 2009; Romero, 1996).

Este capítulo presenta una aplicación del método de multicriterio discreto PROMETHEE (método de organización de clasificación de preferencias para evaluaciones de enriquecimiento) para evaluar sistemas de producción alternativos para el departamento de Pergamino, al norte de Buenos Aires. Se comparan cuatro sistemas en términos de un conjunto de atributos incluidos los indicadores económicos, ambientales y sociales.

## Área de estudio

La propuesta de trabajo se desarrolló en el norte de la provincia de Buenos Aires, tomando como referencia el Partido de Pergamino (Figura 7.1), una de las zonas más productivas y dinámicas del país. El departamento de Pergamino es un área de paisaje de llanura suavemente ondulada. El clima es templado húmedo sin estación seca y el suelo es predominante de aptitud agrícola. La soja, el maíz y el trigo son los principales cultivos de la región, siendo la siembra de soja la actividad agrícola predominante, con aproximadamente el 75% de la tierra agrícola asignada a este cultivo. El área es representativa de la Pampa Ondulada.



Figura 7.1: Localización del Partido de Pergamino en la Provincia de Bs. As.

En las siguientes secciones se describen los pasos para la formulación y resolución del modelo: elección de alternativas, elección de atributos, determinación de los valores para los atributos, cálculo del índice de preferencia multicriterio y *ranking* de alternativas.

## Elección de alternativas

La propuesta es analizar tres alternativas productivas y el monocultivo de soja, este último como referencia de los sistemas simplificados presentes en la zona (Tabla 7.1). Los sistemas alternativos considerados son: (2) Rotación agrícola con alta proporción del suelo cubierto durante el período invernal con doble cultivos/cultivos de cobertura, (3) Sistema mixto que considera una rotación agrícola-ganadera, y (4) Un sistema de producción orgánica. Las principales características de estos sistemas se presentan en la Tabla 7.1. El uso de insumos y los niveles de productividad esperados para una situación normal para cada sistema se estimaron sobre la base de los datos recopilados en encuestas realizadas a productores del partido de Pergamino que llevan a cabo estos sistemas productivos (casos 1, 2 y 3), y de parcelas demostrativas ubicadas en el campo Experimental de INTA Pergamino (caso 4). Se tomaron los valores promedio de las últimas 5 campañas en establecimientos que llevan más de 10 años de historia bajo las alternativas productivas analizadas. Se utilizan precios actuales de insumos y productos (campaña 2017/18). No se evalúa el proceso de transición entre sistemas.

Tabla 7.1: Características de los sistemas productivos

| Sistema de producción                     | Uso de la tierra                      | Rendimiento (tn ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | Fertilización con N (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | Fertilización con P (kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> ) | Uso de pesticidas | Sistema de labranza |
|---|---------------------------------------|--|--|---|-------------------|---------------------|
| 1. monocultivo de soja                    | soja 1ra (100%)                       | 3.5  | 0  | 23  | si                | sin labranza        |
|   | soja 1ra (33%)                        | 4.8  |  |   |                   |                     |
| 2. rotación agrícola                      | trigo/soja 2da (33%)                  | 4.6/3.8  | 47   | 42  | si                | sin labranza        |
|   | vicia (cobertura)/maiz (33%)          | 8.2  |  |   |                   |                     |
| 3. rotación agrícola – ganadera           | raigrás (verdeo)/maiz (40%)           | 7.5  |  |   |                   |                     |
|   | soja 1ra (40%)                        | 3.5  | 51   | 7   | si                | sin labranza        |
|   | pastura consociada base alfalfa (20%) | 0.5 (carne bovina)                                   |  |   |                   |                     |
| 4 - rotación orgánica agrícola - ganadera | maiz (12.5%)                          | 6.4  |  |   |                   |                     |
|   | trigo/soja 2da * (12.5%)              | 3.0/1.7  |  |   |                   |                     |
|   | vicia (cobertura)/maiz (12.5%)        | 6.4  | 0  | 0   | no                | con labranza        |
|   | moha (12.5%)                          | 6.5  |  |   |                   |                     |
|   | pastura consociada base alfalfa (50%) | 0.5 (carne bovina)                                   |  |   |                   |                     |

\* En la producción orgánica se toma como probabilidad de cosecha de la soja un 25%

## Elección de atributos

El concepto de atributos es clave en los modelos multicriterio. Los atributos son aspectos que el tomador de decisión desea considerar para sus elecciones y que toman valores distintos en las alternativas consideradas. La elección del conjunto de atributos que se incluyen en el modelo PROMETHEE para evaluar los sistemas productivos se basa en una selección participativa de indicadores de sustentabilidad. En primer lugar, con información relevada durante una revisión bibliográfica se confeccionó un listado de los indicadores mencionados en la misma. Se utilizó el concepto de Servicios Ecosistémicos para definir y agrupar atributos ambientales. Dentro de este marco conceptual se consideran los servicios de provisión (capacidad para producir alimentos y energía), culturales (e.g., identificación con la actividad, valor estético) y de regulación/soporte (e.g, balance hídrico, secuestro de carbón,

conservación de biodiversidad). Este marco conceptual ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas agroalimentarios y ha sido propuesto como base para la elección de atributos en modelos de decisión multicriterio (Fontana *et al.*, 2013).

Entre 2017 y 2018 se realizó una encuesta a 36 personas cuyas actividades estaban relacionadas con la producción agrícola y la evaluación de la sostenibilidad: (agricultores, asesores agronómicos, investigadores y extensionistas del INTA y profesores universitarios). A estas personas se les preguntó si eliminarían o agregarían indicadores de la lista y se les pidió que seleccionen los tres indicadores más relevantes. La elección de los atributos del modelo se basó en la frecuencia de la selección de los criterios como los más importantes.

Las respuestas sobre la relevancia de los indicadores de sustentabilidad fueron diversas. Casi todos los indicadores fueron seleccionados al menos una vez. Este resultado es consistente con la heterogeneidad en las percepciones de los sistemas agrícolas deseables por actores que pertenecen a distintos segmentos de la sociedad. El resultado económico de las actividades agrícolas fue el indicador que se seleccionó con más frecuencia como uno de los tres indicadores más importantes para la evaluación de la sustentabilidad, seguido por los balances de nutrientes, carbono orgánico del suelo y riesgo de contaminación por agroquímicos (Figura 7.2). Seguidos por la estructura del suelo, la diversidad de micro y meso fauna y la diversidad productiva.

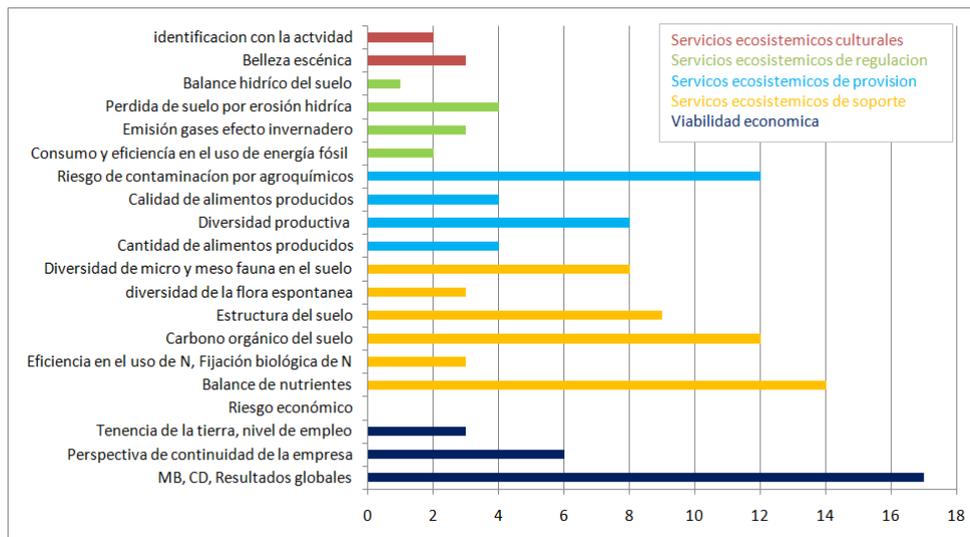


Figura 7.2: Frecuencia con que los indicadores fueron seleccionados dentro de los 3 más importantes para la evaluación de sustentabilidad.

Basados en estos resultados, se seleccionaron los indicadores que fueron jerarquizados con mayor frecuencia y se los consideró como los atributos relevantes. La estructura del suelo, y la diversidad de micro y meso fauna, si bien fueron elegidos por los entrevistados con alta frecuencia, no fueron considerados como atributos en el modelo, dado que no se contaba con la información para su estimación, y se considera que están asociados al contenido de carbono orgánico del suelo.

Para abordar la dimensión social se agregó una variable ordinal de esfuerzo de gestión que indica la complejidad de manejo de las distintas alternativas (Tabla 7.2). Se considera relacionado al nivel de empleo.

Tabla 7.2: Atributos seleccionados para la evaluación de los sistemas productivos

|             | Atributo                                     | Unidad                                   | Tipo         | Forma de cálculo  |
|-------------|--|--|--------------|---|
| Económicos  | Margen bruto (MB)                            | u\$s ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> | cuantitativo | Ingreso menos costos directos (Ghida Daza, 2009)  |
|             | Diversificación productiva (div)             | -  | cuantitativo | div = 1/HH * 10000. El coeficiente de Herfindahl-Hirschman (HH) (Parkin y Loria, 2015) se utiliza comúnmente para medir concentración en las actividades económicas, en este trabajo se utiliza para calcular el nivel de diversificación en el uso de la tierra. El HH se calcula como la suma de los porcentajes al cuadrado de la tierra asignada a cada actividad. Toma valor de 1 para monocultivo y mayores valores para mayores niveles de diversificación productiva. |
| Ambientales | Balance de nitrógeno (BN)                    | kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>   | cuantitativo | N entrada (N fertilizante + N fijación biológica + N precipitación) - N salidas (N productos cosechados) (Alvarez et al., 2014)   |
|             | Balance de fósforo (BP)                      | kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>   | cuantitativo | P entrada (P fertilizante) - P salidas (P productos cosechados)   |
|             | Materia orgánica en el suelo (MOS)           | %  | cuantitativo | Contenido de materia orgánica en el suelo 0-20 cm en el equilibrio: Modelo AMG (Andriulo et al., 1999)  |
|             | Riesgo de contaminación por pesticidas (EIQ) | -  | cuantitativo | EIQ es el coeficiente de impacto ambiental propuesto por (Kovach et al., 1992) Se utilizó el calculador: <a href="https://nysipm.cornell.edu/eiq/calculator-field-use-eiq/">https://nysipm.cornell.edu/eiq/calculator-field-use-eiq/</a>  |
| Social      | Esfuerzo de gestión                          | -  | ordinal      | Escala de 1 a 5. 1 para el menor grado de complejidad de manejo. Determinado por el equipo de investigación.  |

## Valores para los atributos

Para cada alternativa productiva se calcularon los valores de los 7 atributos seleccionados (Tabla 7.3). La tabla permite identificar en que atributo se destaca cada alternativa. La primera alternativa, el monocultivo de soja, tiene la menor complejidad de manejo. La segunda alternativa genera el mejor resultado económico, tiene mayor diversidad productiva y mayor materia orgánica en el suelo. La tercera alternativa tiene los balances de nutrientes más neutrales. La última alternativa, la producción orgánica, no tiene riesgo de contaminación por el uso de pesticidas.

La dirección de los objetivos es de maximización para el margen bruto, la diversificación productiva y la materia orgánica del suelo; de minimización para el riesgo de contaminación con pesticidas y la complejidad de manejo; y de neutralidad para los balances de nutrientes. En este último caso, el objetivo de obtener balances neutros es consistente con el mantenimiento de la productividad del suelo y la reducción del riesgo de la contaminación. Para la resolución del modelo tanto los balances positivos como negativos se consideran en valores absolutos como desvíos y se procede como una minimización para estos dos atributos.

Los índices de preferencia para cada atributo (Tabla 7.4) permiten identificar conflictos (*trade-off*) entre los mismos. Los indicadores con mayor conflicto son los que presentan rojos oscuros y verdes oscuros en la misma fila de la Tabla 7.4. Se destacan los siguientes conflictos:

- El balance de N más neutral se logra con la alternativa de bajo resultado económico, menor contenido de materia orgánica y mayor riesgo de contaminación por pesticidas.
- El mínimo riesgo de contaminación por pesticidas se asocia al menor resultado económico y mayor desbalance de fósforo.
- El mínimo esfuerzo de gestión se logra con la alternativa de menor diversidad productiva, mayor desbalance de N y menor contenido de materia orgánica en el suelo.

Tabla 7.3. Matriz de decisión. Valores de atributos económicos, ambientales y sociales para cada alternativa y parámetros de funciones de preferencia.

| Alternativas                           | Criterios               |                     |                     |                            |  |                       |                     |
|--|-------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|--|-----------------------|---------------------|
|  | Margen bruto            | Balace de nitrógeno | Balace de fosforo   | Materia Orgánica del suelo | Riesgo de contaminación por pesticidas | Diversidad productiva | Esfuerzo de gestión |
|  | u\$s / ha <sup>-1</sup> | Kg ha <sup>-1</sup> | Kg ha <sup>-1</sup> | % (0-20cm prof. suelo)     | EIQ                                    | 1/IHH*10000           | escala (1-5)        |
| 1- monocultivo de soja                 | 522                     | -28,176             | 1,18                | 2,6                        | 53,8                                   | 1                     | 1                   |
| 2- rotación agrícola                   | 678                     | 15,83               | 8,07                | 3,5                        | 48,12                                  | 5                     | 2                   |
| 3- rotación agrícola ganadera          | 391                     | 8,53                | -5,74               | 2,7                        | 93,62                                  | 3,8                   | 3                   |
| 4- rotación agrícola ganadera orgánica | 313                     | 18,38               | -12,27              | 3,3                        | 0                                      | 4,5                   | 5                   |
| Objetivo                               | max                     | = 0                 | = 0                 | max                        | min                                    | max                   | min                 |
| Preferencia                            | V lineal                | V lineal            | V lineal            | V lineal                   | V lineal                               | V lineal              | V lineal            |
| Rango                                  | 365,37                  | 46,56               | 20,34               | 0,9                        | 93,62                                  | 4                     | 4                   |
| qj                                     | 36,537                  | 4,66                | 2,034               | 0,09                       | 9,362                                  | 0,4                   | NC                  |
| pj                                     | 328,833                 | 41,90               | 18,306              | 0,81                       | 84,258                                 | 3,6                   | NC                  |

Tabla 7.4. Índice de preferencia para cada atributo.

| Sistema de producción | Margen bruto (MB) | Balace de nitrógeno (BN) | Balace de fosforo (BP) | Materia orgánica del suelo(MOS) | Riesgo de contaminación con agroquímicos (EIQ) | Diversificación productiva (Div) | Esfuerzo de gestión |
|-----------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|--|----------------------------------|---------------------|
| 1                     | 0,91              | -                        | 1,01                   | -                               | 0,41   | -                                | 3,00                |
| 2                     | 2,27              | 0,15                     | 0,13                   | 2,15                            | 0,48   | 1,28                             | 2,00                |
| 3                     | 0,14              | 0,61                     | 0,29                   | 0,04                            | -  | 0,75                             | 1,00                |
| 4                     | -                 | 0,14                     | -                      | 1,46                            | 2,11   | 1,06                             | -                   |

Nota: Verde más oscuro representa la superioridad de la alternativa en el indicador. Rojo más oscuro representa la inferioridad de la alternativa en el indicador.

## Índice de preferencia multicriterio

Para calcular el índice de preferencia multicriterio se asignaron pesos a distintos indicadores en base a la encuesta mencionada anteriormente. Se realizó un análisis de clusters para agrupar individuos con opiniones similares y definir tipos de perfiles de decisores. Los actores se clasificaron en tres grupos con preferencias sobre los indicadores bien diferenciados. De los tres grupos surgen los perfiles de actores que se muestran en la Tabla 7.5. Los vectores de pesos para cada perfil se calcularon en base a la proporción de actores dentro de cada grupo que eligió a los criterios como los más relevantes.

Tabla 7.5. Vectores de pesos asignados a los indicadores para los tres perfiles de tomadores de decisiones.

| Perfiles  | Margen bruto | Diversidad productiva | Balace de N | Balace de P | Carbono orgánico en el suelo | Riesgo de contaminación por pesticidas | Esfuerzo de gestión |
|---|--------------|-----------------------|-------------|-------------|------------------------------|--|---------------------|
| Énfasis en resultado económico                              | 0.37         | 0.20                  | 0.11        | 0.11        | 0.00                         | 0.17                                   | 0.03                |
| Énfasis en productividad del suelo                          | 0.16         | 0.00                  | 0.12        | 0.12        | 0.48                         | 0.12                                   | 0.00                |
| Énfasis en el riesgo por el uso de pesticidas y complejidad | 0.00         | 0.16                  | 0.00        | 0.00        | 0.00                         | 0.50                                   | 0.34                |
| Objetivo  | MAX          | MAX                   | 0           | 0           | MAX                          | MIN                                    | MIN                 |

### *Resultados del ranking de los sistemas productivos*

Las fortalezas y debilidades de cada sistema productivo dependen de las preferencias de los actores, dado que se determinan a partir de los pesos asignados a cada atributo. Los índices de preferencia multicriterio muestran a la secuencia agrícola como la alternativa preferida en todas las comparaciones de a pares para los tres vectores de pesos, con una sola excepción. El monocultivo de soja es preferido a la secuencia agrícola para el tercer perfil, con énfasis en el riesgo de contaminación y la complejidad.

El *ranking* de alternativas que surge del análisis indica a la rotación agrícola como el sistema productivo de preferencia en el caso de los perfiles decisores con énfasis en el resultado económico y en la productividad del suelo, bajo los criterios de *ranking* completo e incompleto (Figuras 7.3 y 7.4). Para los otros dos tipos de perfiles, de acuerdo al flujo neto, los resultados indican también la preferencia por la rotación agrícola. La producción orgánica aparece como la mejor opción solo en el *ranking* de fortalezas, para el perfil con énfasis en el uso de pesticidas.

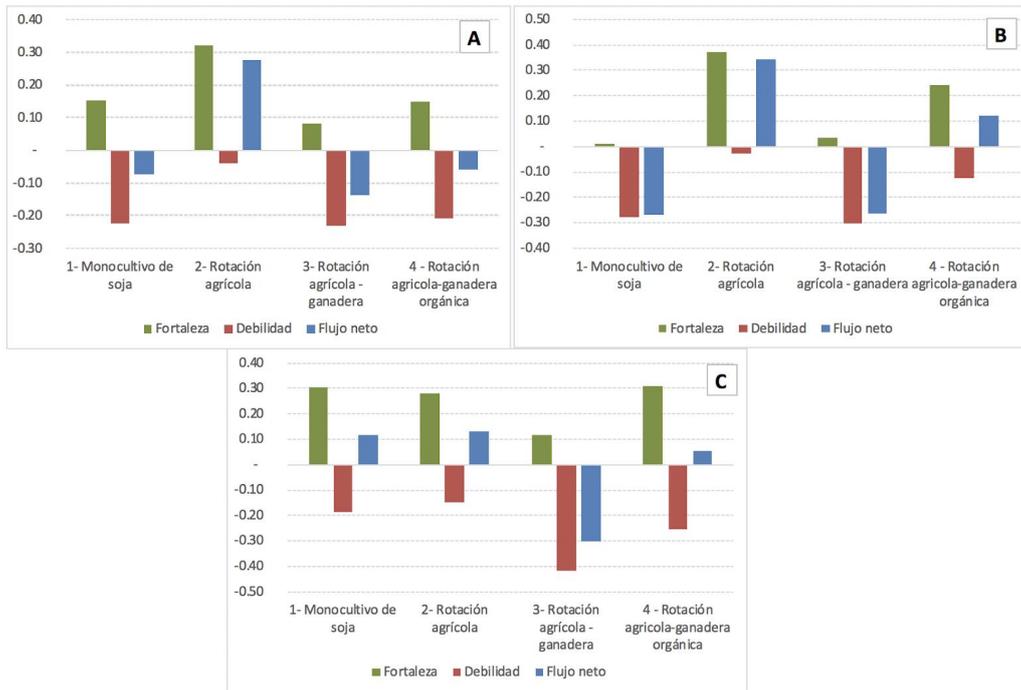
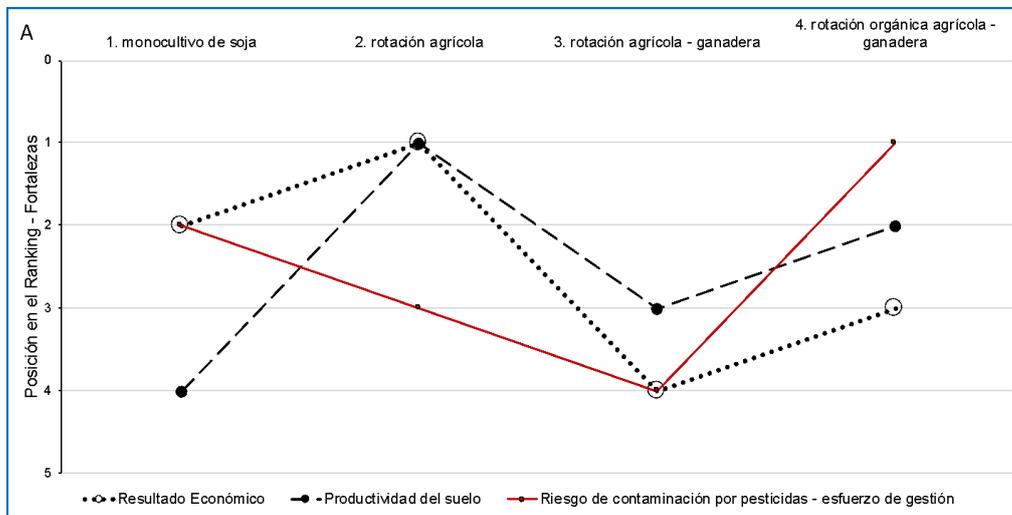


Figura 7.3. Resultados del modelo para los tres perfiles de actores. Panel A: énfasis en el resultado económico. Panel B: énfasis en la productividad del suelo. Panel C: énfasis en el riesgo de contaminación por pesticidas y la complejidad de manejo.



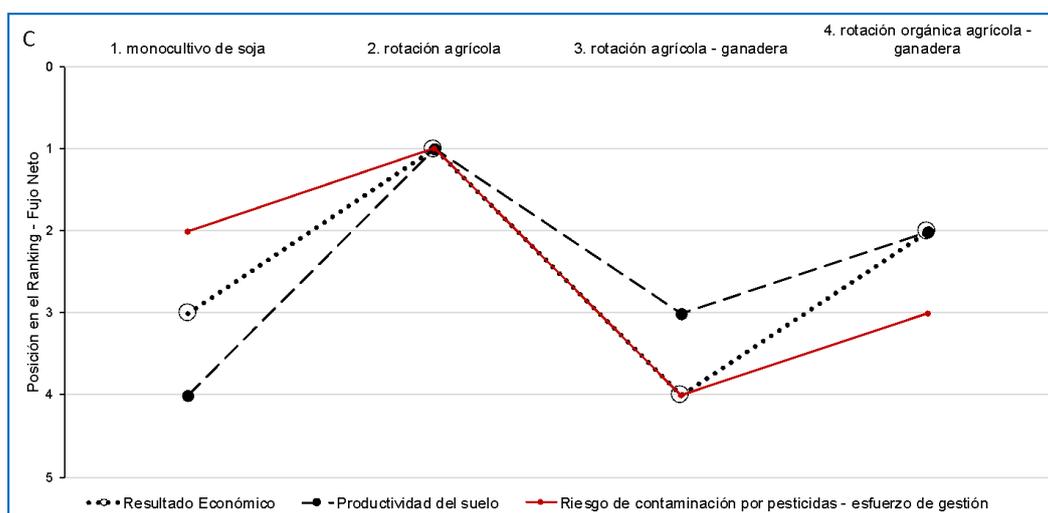
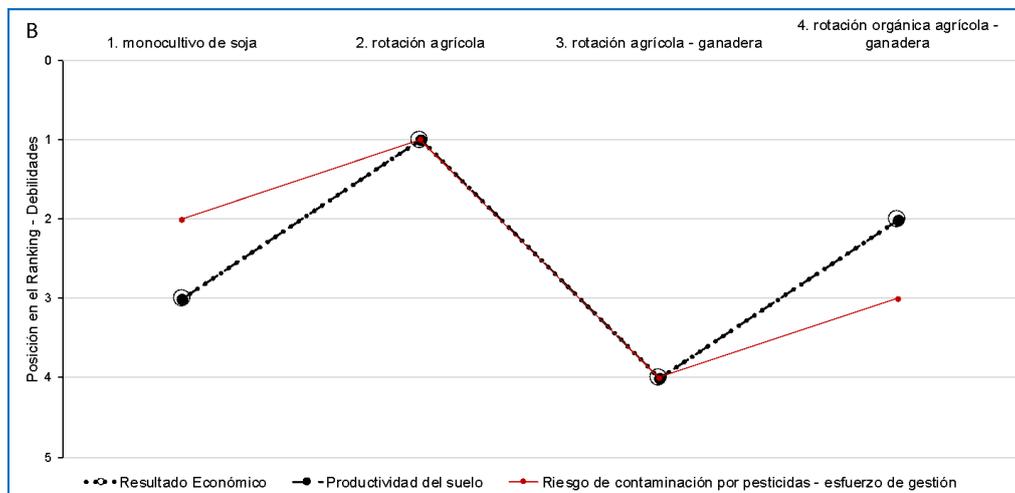


Figura 7.4. Ranking de alternativas según los perfiles de decisores. Panel A: En base a las fortalezas. Panel B: en base a las debilidades. Panel C: en base al flujo neto.

El análisis PROMETHEE permite combinar criterios con diferentes escalas para generar un *ranking* de alternativas preferidas de acuerdo a las preferencias de los decisores. Definir las relevancias de los diferentes atributos para medir la sustentabilidad de agroecosistemas es un desafío, dado la importancia de cada uno de ellos. Por esto, en este análisis se consideran diferentes perfiles de actores, que asignan diferentes pesos a los atributos.

Los resultados señalan al sistema agrícola intensificado como la alternativa de mayor nivel de sustentabilidad, en base a los criterios seleccionados y los pesos asignados para todos los perfiles de decisiones. Es interesante señalar que estos resultados apoyan el creciente interés entre los productores de mayor nivel tecnológico por este tipo de alternativas en la evaluación de las posibilidades de aumentar la cantidad y diversidad de cultivos en planteos agrícolas (e.g., Proyecto Rotaciones CREA-BID 2017, Proyecto Chacras Aapresid - desde 2011). En este trabajo se incluye solo una alternativa de intensificación de las rotaciones basada en un

caso de estudio de la zona, es interesante profundizar el análisis de este tipo de alternativas considerando la inclusión de otros cultivos en las rotaciones de la zona de estudio.

La producción orgánica aparece como la mejor opción solo en el *ranking* de fortalezas, para el perfil con énfasis en el uso de pesticidas. Para este mismo perfil, este sistema aparece en tercer lugar en cuanto a las debilidades. La producción orgánica presenta debilidades en el resultado económico, el balance de fósforo y esfuerzo de gestión, con respecto a todos los otros sistemas. En un contexto de ordenamiento territorial sería interesante investigar las preferencias por esta y otras alternativas específicamente para la zona periurbana.

Como se mencionó en párrafos anteriores, en este trabajo no se evalúa el proceso de transición de una alternativa productiva a otra. Para completar la evaluación ex-ante de sistemas productivos sería necesario ampliar el estudio incluyendo un análisis de los costos y beneficios que se obtienen durante los años de transición, considerando el cálculo del valor actual neto para cada alternativa.

## Conclusión

Los métodos multicriterio discretos proporcionan una manera formal y transparente de combinar información objetiva sobre diferentes atributos de los sistemas agrícolas con las preferencias subjetivas de diferentes actores por estos atributos.

En lugar de señalar una decisión "correcta", el objetivo es ayudar a los tomadores de decisiones a encontrar la alternativa que mejor se adapte a sus objetivos y mejorar su comprensión del problema. Mediante la aplicación de estos métodos es posible una mejor comprensión tanto de las expectativas de la sociedad sobre la producción agropecuaria, como de los incentivos de los productores agropecuarios para elegir qué y cómo producir.

El proceso de cálculo de PROMETHEE de la clasificación final es relativamente complejo y puede ser de difícil interpretación, por lo tanto, puede representar una limitación para su aplicación práctica. Se planea continuar este trabajo compartiendo los métodos y los resultados en grupos focales con diferentes actores, con el fin de difundir el método y evaluar en qué medida este enfoque puede proporcionar una base útil para la discusión sobre el diseño de sistemas agrícolas más sostenibles.

La sustentabilidad es un concepto dinámico, y los diferentes desafíos del sistema agroalimentario han ido cambiando a lo largo del tiempo. La aparición de nuevas preocupaciones y soluciones se deben a los cambios en las actividades productivas y en las prácticas de manejo, a los avances en las mediciones de impactos ambientales, y a los cambios en las preferencias de la población. Los modelos multicriterio son herramientas valiosas en el proceso de elección de los sistemas productivos.

## *Referencias bibliográficas*

Alvarez, R., Steinbach, H. S., y de Paepe, J. (2014). A regional audit of nitrogen fluxes in Pampean agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 184, 1–8.

- Andrade, J. F., Poggio, S. L., Ermácora, M., y Satorre, E. H. (2017). Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *European Journal of Agronomy*, 82, 1-10.
- Andrade, J. F., Poggio, S. L., Ermácora, M., y Satorre, E. H. (2015). Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 67, 37-51.
- Berge, H.F.M., Ittersum, M.K.V., y Rossing W.A.H. (2000). "Farming Options for the Netherlands Explored by Multi-objective Modelling." *European Journal of Agronomy* 13, 263-277.
- Berkhout, E. D., Schipper, R. A., Van Keulen, H., y Coulibaly, O. (2011). Heterogeneity in farmer's production decisions and its impact on soil nutrient use: Results and implications from northern Nigeria. *Agricultural Systems*, 104(1), 63-74.
- Cabrini, S.M., y Calcaterra, C.P. (2016). "Modeling Economic-Environmental Decision Making for Agricultural Land Use in Argentinean Pampas". *Agricultural Systems*, 143, 183-194.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., y Andrade F.H. (2004). "Intensification of Agriculture in the South-eastern Pampas. I. Capture and Efficiency in the Use of Water and Radiation in Double Cropped Wheat-soybean." *Field Crops Research* 87, 117-129.
- Caviglia, O.P., y Andrade, F.H. (2010). "Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources." *American Journal Plant Science*, 3, 1-8.
- FAO (2011). *Ahorrar para Crecer. Guía para los Responsables de las Políticas de Intensificación Sostenible de la Producción Agrícola en Pequeña Escala*. Roma, Italia: Ed. FAO.
- Fontana, V., Radtke, A., Bossi Fedrigotti, V., Tappeiner, U., Tasser, E., Zerbe, S., y Buchholz, T. (2013). Comparing land-use alternatives: Using the ecosystem services concept to define a multi-criteria decision analysis. *Ecological Economics*, 93, 128-136.
- Franzluebbers, A.J., Sawchika, J. y Taboada, M.A. (2014) Agronomic and Environmental impacts of pasture-Crop Rotations in Temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190, 18-26.
- Ghida Daza, C. (Coord.). (2009). *Indicadores Económicos para la Gestión de Empresas Agropecuarias*. Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Godfray, C., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M. y Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 327, 812-818
- Kovach, J., Petzoldt, C., Degnil, J., y Tette, J. (1992). A method to measure the environmental impact of pesticides. *New York's Food and Life Sciences Bulletin*, 139, 1-8.
- Mukherjee, A., Omondi, E. C., Hepperly, P. R., Seidel, R., y Heller, W. P. (2020). Impacts of Organic and Conventional Management on the Nutritional Level of Vegetables. *Sustainability*, 12, 1-25.
- Parkin, M. y Loria, E. (2010). *Microeconomía Versión para Latinoamérica*. Novena edición. Naucalpan de Juárez. México: Pearson educación.
- Peyraud, J.L., Taboada, M. y Delaby, L. (2014) Integrated Crop and Livestock Systems in Western Europe and South America: a Review. *European Journal of Agronomy* 57, 31-42.

- Pinto, P., Long, M. E. F., y Piñeiro, G. (2017). Including Cover Crops During Fallow Periods for Increasing Ecosystem Services: Is it Possible in Croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 48-57.
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., y Pierzynski, G. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446.
- Pretty, J., Toulmin, C., y Williams, S. (2011). Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9(1).
- Reganold, J. P., y Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature plants*, 2(2), 1-8.
- Restovich, S. B., A. E. Andriulo, y Portela S. I. (2012). Introduction of Cover Crops in a Maize–soybean Rotation of the Humid Pampas: Effect on Nitrogen and Water Dynamics. *Field Crops Research* 128(0), 62-70.
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E., y Améndola, C. (2011). Inclusion of Cover Crops in a Soybean-corn Rotation: Effect on some Soil Properties. *Ciencia del suelo*, 29(1), 61-73
- Rimski-korsakov, H., Alvarez, C. R., y Lavado, R. S. (2015). Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 134A–140A.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Y de Fraiture, C. (2017). Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability. *Ambio*, 46(1), 4-17.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid: Isdefe.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J. E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., y Dore, T. (2008). Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 163-174.
- Satorre, E. H. (2005). Cambios Tecnológicos en la Agricultura Argentina Actual. *Ciencia hoy*, 15(87), 24-31.
- Viglizzo, E.F.; Frank, F.C.; Carreño, L.V.; Jobbágy, E.G.; Pereyra, H.; Clatt, J.; Pincén, D. y Ricard, M.F. (2011). Ecological and Environmental Footprint of 50 Years of Agricultural Expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17, 959-973.