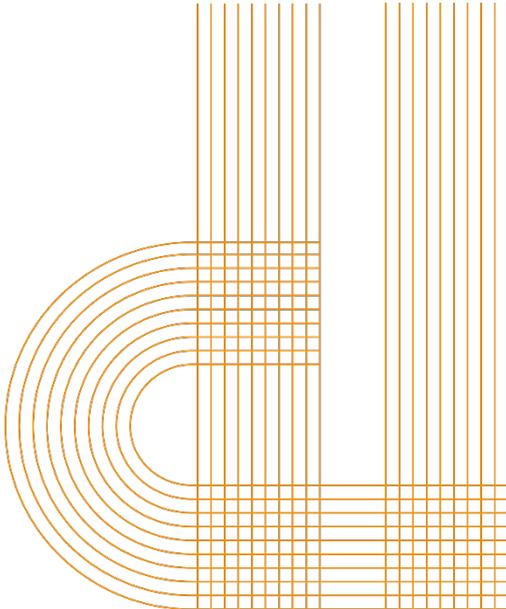


*La evaluación de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas mediante el Análisis Multicriterio (MCA).
Una revisión sistemática de la literatura*

Claudia Daniel Escurza González

David Pérez Neira

Xavier Simón Fernández



*Coordinator: Olga Alonso-Villar
ovillar@uvigo.es*

La evaluación de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas mediante el Análisis Multicriterio (MCA). Una Revisión Sistemática de la Literatura

ESCURZA GONZÁLEZ, Claudia Daniel¹; PÉREZ NEIRA, David²; SIMÓN FERNÁNDEZ, Xavier³

¹ Universidade de Vigo, claudiadaniel.escurza@uvigo.gal; ² Universidad de León, dpern@unileon.es; ³ Universidade de Vigo, xsimon@uvigo.gal

Resumen

Los sistemas de cultivo actuales, de carácter intensivo, deben abordar importantes desafíos relacionados con la insostenibilidad ambiental, económica y social. Este estudio presenta una Revisión Sistemática de la Literatura (SLR) sobre la evaluación de la sostenibilidad mediante Análisis Multicriterio (MCA) de los sistemas y de los manejos agrícolas alternativos a los convencionales, destacando el potencial de este enfoque para integrar todas las dimensiones de la sostenibilidad. Se identificaron 60 estudios relevantes, a través de los cuales se pretendía valorar el impacto de la transición hacia una producción agraria ecológica, así como identificar los sistemas y prácticas más prósperas. Como cabía esperar, los resultados evidencian frecuentes *trade-offs* entre las dimensiones de la sostenibilidad, particularmente entre los objetivos ambientales y económicos, así como discrepancias dentro de cada ámbito. No obstante, prácticas como la diversificación de cultivos (especialmente cuando se diversifica con leguminosas), las técnicas de riego eficiente y los sistemas integrados de cultivo-ganado destacan por sus numerosos impactos positivos. En contraste, la labranza reducida presenta importantes limitaciones. Asimismo, los sistemas alternativos sufren dificultades comunes, incluyendo elevados costes iniciales, mayor complejidad operativa y la falta de formación adecuada. Estas limitaciones destacan la necesidad de políticas de apoyo que fomenten la adopción de métodos de producción sostenibles, a través de la educación y de la cooperación, y faciliten el acceso a recursos financieros. En conclusión, el estudio demuestra que los sistemas alternativos pueden disminuir los impactos ambientales sin perjudicar los aspectos económicos y sociales, siempre que las estrategias se diseñen teniendo en consideración tanto las especificidades locales como a todos los grupos de interés involucrados en ellos.

Códigos JEL: Q15, Q56, Q57

Palabras clave: sistemas de cultivo, alimentación sostenible, evaluación multicriterio, impacto ambiental, impacto socioeconómico

Este trabajo, presentado en el X Congreso Internacional de Agorecología, celebrado en Viseu (Portugal) los días 2-5 de septiembre de 2024, contó con el apoyo económico y logístico del proyecto Agroecological strategies for sustainable weed management in key European crops (AGROSUS; Project 101084084) del programa HORIZON de la Unión Europea

Abstract

Today's intensive farming systems must address significant challenges related to environmental, economic and social unsustainability. This study presents a Systematic Literature Review (SLR) on sustainability assessment using Multi-Criteria Analysis (MCA) of alternative to conventional farming systems and management, highlighting the potential of this approach to integrate all dimensions of sustainability. Sixty relevant studies were identified, through which it was intended to assess the impact of the transition to organic agricultural production, as well as to identify the most successful systems and practices. As expected, the results show frequent trade-offs between the dimensions of sustainability, particularly between environmental and economic objectives, as well as discrepancies within each domain. Nevertheless, practices such as crop diversification (especially when diversifying with legumes), efficient irrigation techniques and integrated crop-livestock systems stand out for their numerous positive impacts. In contrast, reduced tillage presents important limitations. Alternative systems also suffer from common difficulties, including high initial costs, increased operational complexity and lack of adequate training. These constraints highlight the need for supportive policies that encourage the adoption of sustainable production methods, through education and cooperation, and facilitate access to financial resources. In conclusion, the study demonstrates that alternative systems can reduce environmental impacts without harming economic and social aspects, provided that the strategies are designed taking into consideration both local specificities and all stakeholders involved in them.

Key words: farming systems, sustainable food, multi-criteria assessment, environmental impact, socioeconomic impact.

1. Introducción

La producción moderna de alimentos, principalmente a través de monocultivos industriales, confronta numerosos problemas de insustentabilidad. El cambio climático, la alta dependencia de combustibles fósiles, el uso intensivo de productos químicos de síntesis y la sobreexplotación del suelo y del agua son algunos de los retos más importantes a los que nos enfrentamos. Es necesario, por tanto, avanzar hacia modelos de agricultura que incorporen prácticas agrícolas más sostenibles, que reduzcan la dependencia de los recursos naturales y contribuyan a conservar el suelo y la biodiversidad de los agroecosistemas (Carof et al., 2013; Cunha et al., 2023; Liang et al., 2022). A estas demandas ecológicas hay que sumarle otros desafíos de carácter socioeconómico relacionados con la satisfacción de las necesidades alimentarias de la población mundial, la calidad de los productos ofrecidos, el nivel de rendimiento de las explotaciones y la contribución esperada de los sistemas agrarios al empleo y a la sociedad (Craheix et al., 2015).

El concepto de desarrollo sostenible, plasmado por primera vez en el Informe Brundtland (1987), ofreció un punto de partida para una inmensa cantidad de estudios cuyo objetivo es la medición de la sostenibilidad de los sistemas agrarios. No obstante, muchos han sido los intentos de definir la sostenibilidad y, más aún, de operativizarla, particularmente en la agricultura. A pesar de dicha dificultad, existe cierto consenso sobre la ciencia de la sostenibilidad (“*Sustainability Science*”): se trata de una disciplina holística, integradora y compuesta al menos de tres pilares, a saber, el ambiental, el económico y el social (“*Triple Bottom-Line*”), cuyo fin es ofrecer soluciones para la complejidad de las interacciones entre la naturaleza y el ser humano (Brandt et al., 2013; Hacking & Guthrie, 2008; Sala et al., 2013). Por lo tanto, consideramos necesaria una exploración simultánea de varias dimensiones para poder emitir un veredicto sobre esta. En un intento de acotar toda la literatura sobre medición de impactos de sostenibilidad a aquellos estudios que tengan en consideración el carácter multidimensional de esta, nuestra investigación se centra en las evaluaciones multicriterio enfocadas en los sistemas agrarios.

Así pues, el Análisis Multicriterio (MCA en adelante) permite efectuar una evaluación completa al combinar diferentes enfoques metodológicos y fusionar sus resultados en un marco coherente. Por su parte, el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) facilita la inclusión directa de las preferencias de distintos grupos de interés o *stakeholders*, suministrando información para aplicaciones prácticas valiosas, como la mejora de políticas agrícolas a nivel regional o de los métodos de producción a nivel de finca o cultivo (De Luca et al., 2015). No obstante, el MCDA adolece de dos limitaciones críticas: i) hay numerosos indicadores que resultan fundamentales para la sostenibilidad de un sistema y que en ocasiones no se pueden tener en cuenta por la complejidad de su cálculo, determinando la sostenibilidad de una dimensión con un indicador sintético que no recoge toda la información necesaria (De Olde et al., 2016) y, ii) tanto la creación de los indicadores sintéticos como los rankings en base a estas puntuaciones están fuertemente condicionadas por las ponderaciones que se otorgan a cada

criterio y cada dimensión, por lo que, si en el artículo no figuran los impactos individuales (valor de cada criterio), no es posible conocer a qué factor se debe el resultado de la medición (Bartzas & Komnitsas, 2020; Mazzetto & Bonera, 2003; Singh et al., 2012).

Si bien al efectuar el mapeo inicial de la literatura se han encontrado publicaciones que realizan revisiones sistemáticas sobre los métodos de evaluación de la sostenibilidad de los cultivos (Deytieux et al., 2016), las herramientas de MCA y MCDA (Carof et al., 2013; Sadok et al., 2008), la diversidad de evaluaciones de este tipo (Gesán-Guiziou et al., 2020), la evaluación genérica (es decir, sin ser análisis multicriterio) de la sostenibilidad de prácticas concretas, como los cultivos de cobertura (Riviere et al., 2022), o de sistemas específicos como la agroecología (Mouratiadou et al., 2024) o la integración cultivo-ganado (Peyraud et al., 2014); no se ha hallado ningún estudio que combine todas las premisas aquí establecidas.

De este modo, en el presente trabajo se lleva a término una Revisión Sistemática de la Literatura sobre aquellas investigaciones que evalúan mediante MCA el impacto de la producción agrícola, tanto en diseños *ex ante* como en experimentos *ex post*. De esta forma, el objetivo principal es comprobar si los sistemas de cultivo alternativos a los convencionales reducen el impacto ambiental sin comprometer los aspectos económicos y sociales. Más específicamente, se pretenden hallar los manejos alternativos más prometedores, esto es, aquellas prácticas con menores *trade-offs* tanto entre las distintas dimensiones de la sostenibilidad, como dentro de las mismas.

En el apartado 2, relativo a la metodología, se definen las revisiones sistemáticas de la literatura y se detallan las especificidades de esta. El apartado 3 sintetiza las prácticas y sistemas sujetos al análisis, mostrándose aquí los resultados de impacto de todos ellos sobre cada una de las dimensiones de sostenibilidad y de los indicadores de impacto de estas. Así, figuran también los indicadores mayormente empleados para medir los efectos de los sistemas de cultivo. En la discusión se señalan las compensaciones entre indicadores y dimensiones, junto con las prácticas que arrojan los mejores resultados. Finalmente, en el apartado 5 se presentan las conclusiones.

2. Metodología

2.1 Definición y estructura de las revisiones sistemáticas de la literatura

Una revisión sistemática de la literatura o SLR (*Systematic Literature Review*) es un método de búsqueda completo, minucioso y transparente de las obras más importantes escritas sobre una determinada materia, las cuales, una vez localizadas, son sometidas a un análisis que debe prefijarse y explicitarse con el doble objetivo de evitar una investigación sesgada y de permitir que cualquiera que lo desee pueda replicarla (Linnenluecke et al., 2020; Moher et al., 2009). De esta forma, analizando y sintetizando un grupo de trabajos relacionados existentes, se pueden poner a prueba hipótesis de investigación como la expuesta en el apartado previo.

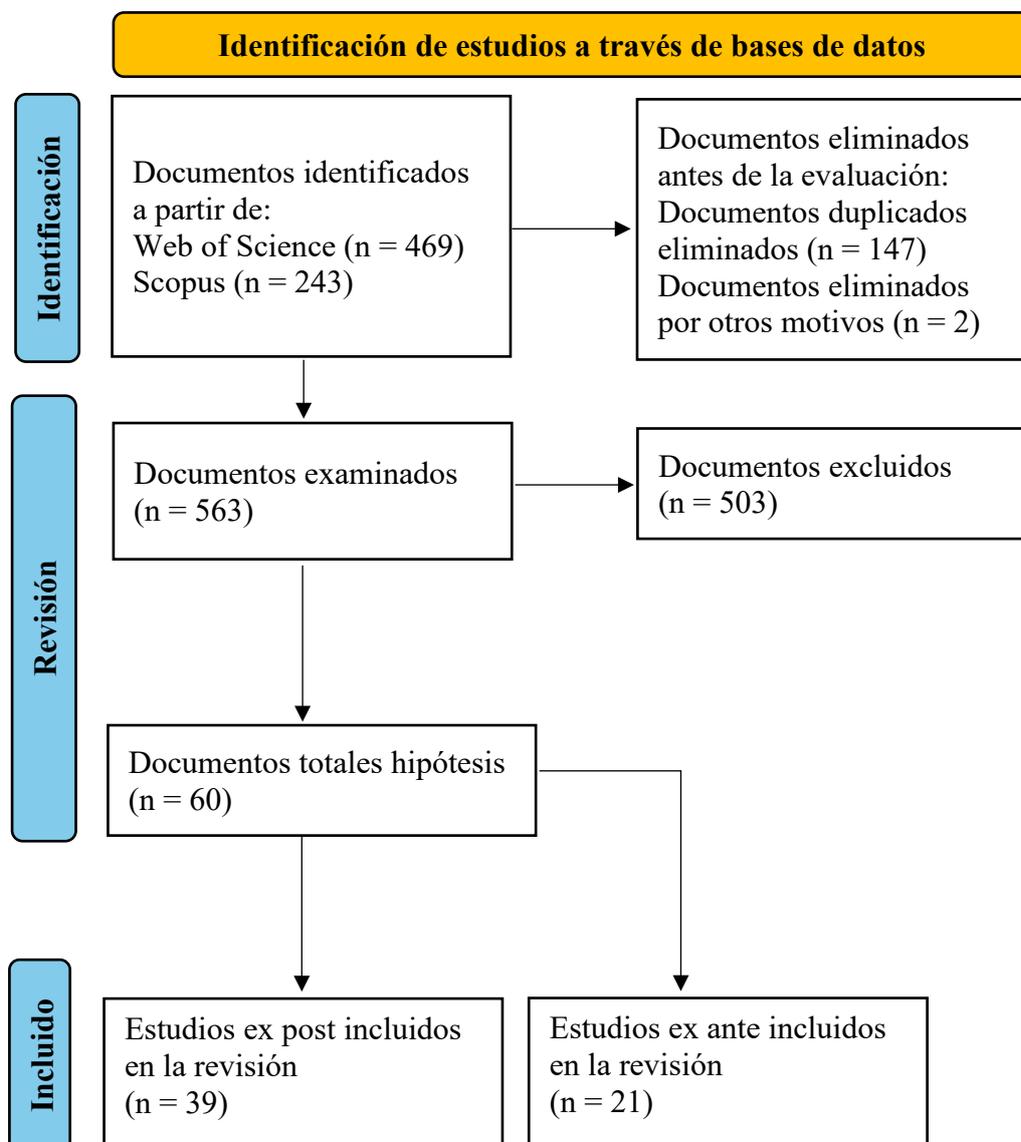
Una SLR sigue una estructura determinada, compuesta de tres etapas principales que se subdividen en una serie de pasos. En la planificación, es necesario formular la pregunta de investigación y establecer el protocolo de extracción de información. La realización implica la búsqueda de la literatura, la fijación de los criterios de inclusión (o de exclusión), la evaluación

de la calidad de los documentos, la extracción de los datos y la síntesis de los mismos. Finalmente, se han de presentar no solo las conclusiones de la revisión, sino también los detalles del proceso, como la cadena de búsqueda, los criterios de inclusión, el formulario de extracción de datos (Anexo 1) y el diagrama de flujo (Xiao & Watson, 2019).

2.2. Cadena de búsqueda, conjunto final de estudios y tratamiento de datos

El diagrama de flujo PRISMA permite reflejar las etapas de la revisión con el conjunto concreto de documentos objeto de estudio (Moher et al., 2009).

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de este estudio¹

Se identificaron 565 documentos (712 sin eliminar los duplicados) en las bases de datos bibliográficas Web of Science y SCOPUS a través de la siguiente cadena de búsqueda:

agriculture AND "crop" ("multi-criteria assessment" OR "multicriteria assessment" OR "multi criteria assessment" OR "multicriteria evaluation" OR "multi-criteria evaluation" OR "multi criteria evaluation" OR "multi-criteria analysis" OR "multicriteria analysis" OR "multi criteria analysis")*

De la búsqueda inicial, 60 cumplieron los criterios de inclusión, siendo estos i) estar redactados en inglés, francés o español, ii) ser un análisis multicriterio (y no únicamente un análisis de decisión multicriterio), iii) analizar al menos dos dimensiones de sostenibilidad (ambiental, económica y social), iv) enfocarse en metodologías de producción de cultivos, v) efectuar una comparativa entre manejos o sistemas convencionales y alternativos (o entre sistemas alternativos diferentes) y vi) tener entre sus objetivos la evaluación de la sostenibilidad. Entre ellos se encuentran 39 análisis *ex post* y 21 *ex ante*. De esta forma, los artículos que conforman la revisión son aquellos que, de manera empírica, comparan los impactos de las prácticas o sistemas alternativos frente a los convencionales sobre dos o más ámbitos de la sostenibilidad, y muestran los resultados directos o, de expresarse en indicadores sintéticos, en los que la ponderación de los indicadores no empaña el efecto real de la producción sobre estos. Los artículos pertenecientes a la SLR aparecen enumerados del 1 al 60, con el fin de facilitar su sistematización (Anexo 2).

Partiendo de una lectura preliminar de los documentos, y con el fin de operativizar los resultados, se han identificado seis sistemas alternativos evaluados mediante MCA (sistemas de bajos insumos, agricultura orgánica, agricultura de conservación, manejo integrado de plagas, sistemas agroecológicos y sistemas de integración cultivo-ganado), así como cuatro prácticas que se ponen en marcha de manera aislada en numerosas ocasiones (diversificación, labranza reducida, gestión eficiente del riego y cultivos de cobertura). Valiéndonos de la clasificación que se presenta en el apartado 3.1, se organizan por cada sistema y, cuando es posible, por cada manejo particular, los resultados de impacto sobre todos los indicadores y dimensiones.

3. Resultados

3.1 Sistemas de producción y prácticas asociadas a estos

La mayoría de los estudios comparan el monocultivo intensivo con los sistemas alternativos mencionados anteriormente. El sistema en monocultivo intensivo incluye, principalmente, el empleo de pesticidas, pero también es caracterizado por: el arado profundo, el uso excesivo de agua, recurriendo en ocasiones a la sobreexplotación de las aguas subterráneas, el abuso de recursos no renovables como la energía y determinados fertilizantes y la quema de rastrojos.

¹ La plantilla empleada para la elaboración de la figura nace de la Declaración Prisma. Véase <https://prisma-statement.org/>

Su principal objetivo es la maximización del beneficio económico, ligada a una elevada dependencia de inputs comercializados (Li et al., 2021; Parra-López et al., 2008).

En contraposición a estos, los 6 sistemas de producción alternativa se describen a continuación:

- A) *Sistemas de bajos insumos*. Entre los sistemas de producción sostenibles diseñados aparecen repetidamente aquellos cuyo objetivo es disminución de productos químicos de protección de las plantas, de la fertilización y de diversos insumos. Estos sistemas se componen de una amalgama de manejos particular para cada experimento, centrándose en los distintos problemas que pueden sufrir los cultivos. Por ejemplo, para controlar las malas hierbas puede realizarse un control biológico a través de feromonas y granolavirus [10], un control mecánico [10, 39] o un control manual de las mismas. De cara a la prevención de enfermedades fúngicas pueden implantarse cubiertas antilluvia [10], usar antagonistas biológicos [10], sustituir los fungicidas sintéticos por azufre y bicarbonato de potasio y utilizarse variedades robustas del cultivo [10, 28]. Cuando se desea frenar la proliferación de nematodos, pueden acortarse los ciclos entre cada replantación [52].
- B) *Agricultura orgánica*. Estos sistemas también se conforman por diversas prácticas que tienen por objeto reducir los productos sintéticos de protección, como la sustitución de estos por cobre o azufre [10, 22], el deshierbe mecánico [22] o tratamientos de la fruta postcosecha (como el lavado con agua caliente) [10]. No obstante, generalmente su particularidad radica en el empleo de productos de carácter orgánico, ya sea mediante fertilización con residuos orgánicos como a través de la elaboración de productos fitosanitarios con hierbas medicinales [40].
- C) *Agricultura de conservación*. Puede considerarse un subsistema de la agroecología, fundamentado en la utilización simultánea de tres manejos: labranza cero, cobertura permanente del suelo y diversificación [33].
- D) *Sistemas de gestión integrada de plagas (IPM)*. Llevan a cabo manejos cuyo objetivo es reducir la utilización indiscriminada de productos químicos para el control de estas. Entre ellos se encuentran la aplicación de agentes de control biológico, el tratamiento con película de partículas, la instalación de mallas de cobertura de huertos, o el uso de sistemas de alerta para decidir el momento de aplicación de los fungicidas [35].
- E) *Sistemas agroecológicos*. Dentro de la agroecología se observa el empleo de manejos como la agrosilvicultura, los cultivos intercalados, la no labranza, el control integrado de plagas, el no uso de pesticidas, la reducción de la fertilización química, la rotación de cultivos [14], los semilleros falsos, la siembra de variedades robustas [28], el uso de productos de biocontrol y la monitorización tanto de la necesidad de fertilizantes como de pesticidas para ajustar las cantidades de estos a lo largo de los ciclos [15]. No obstante, cabe mencionar que, si en las investigaciones agroecológicas solo se realiza una práctica, o es posible separar los impactos de cada una, no estudiaremos los efectos en este apartado, sino en el correspondiente a cada manejo.
- F) *Sistemas de integración cultivo-ganado*. La integración de ganado en los sistemas especializados de cultivo (ICLS) tiene por objeto el aprovechamiento de los recursos que se generan en ambos sistemas por separado. De esta forma, los granos forrajeros generados por el subsistema de producción de cultivos se destinan al subsistema

ganadero, al tiempo que el estiércol producido por el subsistema ganadero sirve como nutriente para los subsistemas de producción de cultivos y hortalizas [13].

Por su parte, las prácticas que figuran frecuentemente de manera aislada son:

- G) *Diversificación*. Ante la insostenibilidad tanto del monocultivo como de la intensificación basada en duplicar la producción de un único cultivo [1, 7], numerosos agricultores e investigadores optan por la diversificación, ya sea en forma de cultivos intercalados [4, 54] o de rotación de cultivos [7], pudiendo utilizarse ambas [1] como parte de la estrategia de producción. La diversificación con leguminosas es una práctica destaca dentro de esta [12, 23, 41, 42, 43, 46, 56].
- H) *Labranza reducida o labranza cero*. Es uno de los pilares de la agricultura de conservación (CA) [8], aunque también es común encontrarla como práctica sostenible de manera aislada [17, 20]. El escenario más extremo de este manejo es la siembra directa, que procura no alterar la capa superficial de suelo, prescindiendo de las operaciones de arado [9, 20, 23].
- I) *Gestión eficiente del riego*. Frente a los métodos convencionales como la inundación continua, surgen alternativas como el riego por goteo (riego localizado suministrado mediante goteros) [14, 34] y el riego intermitente (riego por surcos en intervalos frecuentes pero cortos) [2].
- J) *Cobertura del suelo*. Puede realizarse mediante la siembra de cultivos de cobertura, cuya finalidad no es el consumo humano o la venta de los mismos, sino la protección del suelo ya sea en los periodos donde el suelo se encuentra desnudo como durante el ciclo de cultivo; y también a través del mantillo, esto es, una capa de materiales que actúa como barrera frente a la erosión y los cambios drásticos de temperatura [9, 23].

3.2 Impactos sobre cada dimensión de sostenibilidad

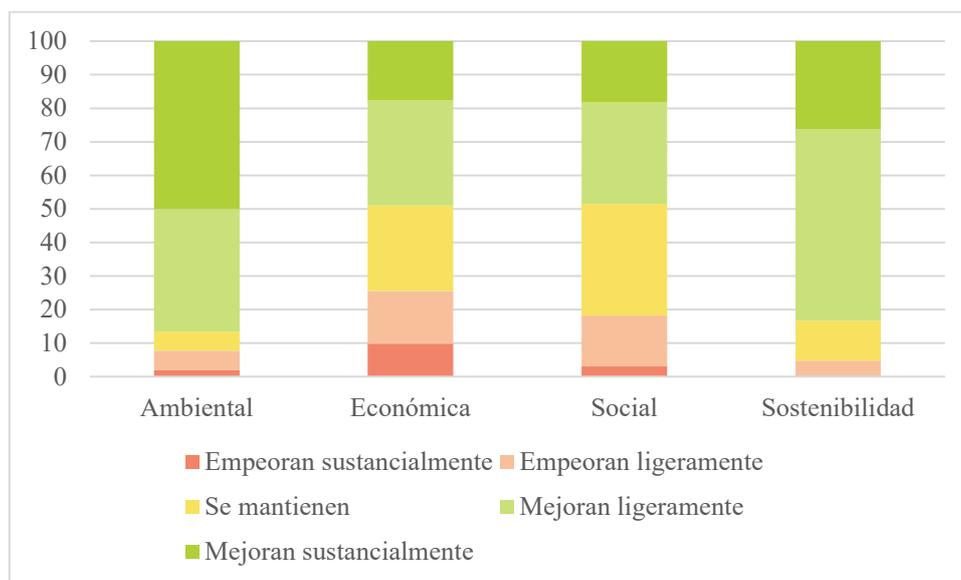
Previo al desarrollo de los efectos de cada sistema y manejos particulares, se muestran el número de artículos que ha evaluado cada dimensión, así como los resultados de la transición de los sistemas convencionales hacia los sistemas/prácticas alternativas, agrupados en cinco categorías: mejoran sustancialmente, mejoran ligeramente, se mantienen, empeoran ligeramente y empeoran sustancialmente (Tabla 1). Adicionalmente, la Figura 2 expresa dichas variaciones en porcentaje con respecto al total de artículos analizados en cada dimensión. Cabe señalar que la clasificación en estos cinco grupos se ha realizado o bien: a) tomando en consideración lo determinado por los propios autores o, b) concluyendo que se trata de la dirección tomada por la sostenibilidad en base a los resultados de todos los indicadores y a los *trade-offs* entre ellos.

Tabla 1. Variaciones experimentadas en todos los ámbitos y en la sostenibilidad global (n° de artículos)

	Ambiental	Económica	Social	Sostenibilidad
Mejoran sustancialmente	26	9	6	11
Mejoran ligeramente	19	16	10	24
Se mantienen	3	13	11	5
Empeoran ligeramente	3	8	5	2
Empeoran sustancialmente	1	5	1	0
Total	52	51	33	42

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de este estudio

Figura 2. Variaciones experimentadas en todos los ámbitos y en la sostenibilidad global (% sobre el total de artículos analizados para cada dimensión)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de este estudio

3.2.1 Dimensión ambiental

Los aspectos ambientales se alzan como los más analizados (52 artículos de los 60), y también como los más favorecidos, pues al aplicar métodos alternativos mejoran en un 86% de las ocasiones. A continuación, se explican los principales determinantes de los impactos ambientales (de la A a la J):

A) Sistemas de bajos insumos

El efecto inmediato de estas técnicas es la caída de los índices de frecuencia de tratamiento (TFI) [10, 16, 24, 26, 28, 39, 44, 45, 49, 50, 53], que puede venir acompañado de mejoras en la ecotoxicidad del agua superficial, del agua dulce, del suelo, o del medioambiente [54], en función del impacto de los ingredientes activos de los productos empleados [10, 45, 49], permitiendo a su vez la presencia de la flora acompañante [10] y, por tanto, incrementando la biodiversidad [45, 49]. También la actividad y la biomasa bacteriana, así como otros indicadores de calidad del suelo como la velocidad de mineralización del nitrógeno [16], el contenido de carbono orgánico [24], la lixiviación de pesticidas [39, 49] y de nitratos [50, 53] pueden verse favorecidos por prácticas tanto de carácter técnico como organizativo y estructural. El uso de cultivos de cobertura durante los periodos de mayor riesgo de erosión, junto con la disminución del laboreo, también favoreció la calidad del terreno [45]. No obstante, la instalación de algunas de las estructuras de protección mencionadas (como las redes para insectos o las cubiertas antilluvia) puede causar incrementos del GWP [10]. El recorte en los insumos necesarios no solo reduce la dependencia de inputs externos, sino que también puede traducirse en menores emisiones de GEI [26, 49, 53, 54], así como en una mayor eficiencia de los recursos dedicados, como la energía [49] o el fertilizante [24, 28]. Estos sistemas acostumbran a respetar las variedades locales, promoviendo la conservación de la biodiversidad [26]. Cabe señalar que mediante la aplicación de aceites esenciales [16] se puede reducir la dependencia de los pesticidas al tiempo que la utilización del cobre, pues las fórmulas cúpricas elevan el riesgo ecotoxicológico [44].

Por otro lado, nos encontramos con sistemas que pretenden reducir fertilizantes como la urea [31, 54]. Si se pretende disminuir también la cantidad de pesticidas, esto puede producir el efecto contrario: acabar aumentando el uso de estos últimos para mantener bajo control las plagas y las malas hierbas [31]. Si solo se centran en la disminución de la urea, no solo disminuyen los recursos incorporados en la producción, sino también las emisiones, mejorando la sostenibilidad de la energía [54]. En otros casos, el objetivo es disminuir la cantidad de fertilizante, para lo que puede emplearse nanofertilizantes [34], aplicando una cantidad más baja que la de los fertilizantes químicos convencionales, resultando positivamente en todos los aspectos ambientales analizados (hasta 12 veces menos emisiones de N₂O, mayor eficiencia tanto en el uso del agua como en el de los fertilizantes, menores consumo de energía y lixiviación de nitratos) [34]. Por último, en las ocasiones en las que se pretende reducir la cantidad de pesticidas manteniendo o incrementando la rentabilidad, es probable que aumente la cantidad de fertilizante, así como la introducción de maquinaria para el deshierbe, lo que puede aumentar el riesgo de erosión del suelo [39].

B) Agricultura orgánica

Uno de los fundamentos de la agricultura orgánica es la reducción del uso de pesticidas [10, 27, 47]. En este caso, se ponen en práctica métodos de control similares a los mencionados en el apartado previo. Es frecuente la utilización de sustancias como el cobre y el azufre [10, 22]

para la prevención de plagas, lo que puede traer consigo incrementos en la toxicidad del agua dulce [10]. Además, actividades como el deshierbe mecánico [22] o el tratamiento con agua caliente posterior a la cosecha [10] fomentaron el GWP. Por otro lado, el ODP mejoró como resultado de la eliminación de los pesticidas [22]. Hay que tener en consideración que, en ocasiones, el mayor impacto negativo sobre el medioambiente se debe a un menor rendimiento, lo que aumenta la incidencia por kilogramos de producto [22]. También puede verse minorada la cantidad de fertilizante necesaria para los cultivos [47].

Si atendemos al impacto sobre el suelo, la OA, al combinar manejos como la labranza reducida y la diversificación, puede dar lugar a una menor erosión, a un control adecuado de la materia orgánica y a la conservación de la macrofauna presente en el mismo [23].

Cuando la OA se fundamenta en la fertilización mediante productos orgánicos, nos encontramos con una disminución de la acumulación de nitrógeno nítrico en el suelo [40], un incremento de la proporción de carbono activo en este y de la agrobiodiversidad, así como con una mejora de la calidad del agua [36, 40]. En otro experimento, este manejo no solo rebajó la presión sobre el medio ambiente, sino que también aumentó la sostenibilidad de la emergencia [13].

C) Agricultura de conservación

Si bien el problema de la erosión del suelo se redujo gracias a estas prácticas [18, 23, 37, 57], el impacto sobre el medio ambiente y la salud humana se vio en ocasiones agravado como consecuencia de la mayor cantidad de herbicidas empleados (no solo para el manejo de las malas hierbas, sino también para la desecación de la parte vegetativa de los cultivos precedentes para evitar el laboreo del suelo) [18], pudiendo destacar la dependencia del glifosato [33]. Esto no sucedió en experimentos en los que se emplearon leguminosas como cultivos de cobertura, donde el control de plagas y malas hierbas fue bastante efectivo sin la necesidad de aumentar el uso de pesticidas, lo que mejoró la calidad del suelo, la eficiencia del fertilizante y la conservación de la agrobiodiversidad [37]. Por otra parte, el consumo de combustible decreció ante la ausencia de operaciones de labranza [33].

D) Gestión Integrada de Plagas

El efecto inmediato de estos sistemas es la caída en el uso de pesticidas químicos, con la consecuente disminución de la ecotoxicidad tanto del agua como de la fauna y de los organismos presentes en el suelo [35, 47, 48]. No obstante, el logro sucede en las ocasiones en las que, pese a esta reducción (o incluso eliminación), el control de plagas resulta igual de efectivo que el de los métodos convencionales [35]. Si la gestión integrada supone además la disminución del arado y de la fertilización, esto puede traducirse en una menor acumulación de nitrógeno nítrico en el suelo y en el agua, disminuyendo también en esta última concentración de fósforo [40, 48]. Si entre las prácticas se encuentra la diversificación, esto puede favorecer la disminución de la cantidad de fertilizante nitrogenado, el consumo de combustible y mejorar la eficiencia energética [47, 48].

E) Sistemas agroecológicos

Debemos tener en consideración que los resultados derivados de este sistema engloban los impactos de numerosas prácticas ya analizadas. De esta forma, la disminución en el uso de productos químicos [30] y la mejora de la biodiversidad como resultado de la reducción del uso de pesticidas y de la diversificación de cultivos son efectos conocidos [14, 15]. La calidad del suelo también se ve regenerada bajo los manejos agroecológicos, principalmente en forma de contenido de materia orgánica [30]. También puede decrecer el consumo de energía, especialmente de aquella generada fuera del propio sistema [30].

F) Integración cultivo-ganado

Estos sistemas permiten no solo reducir la dependencia de recursos externos y no renovables, sino también la sustitución de productos químicos por estiércol para obtener el nitrógeno necesario. Por todo ello, el índice de presión medioambiental fue menor para los ICLS, a pesar de que estos sistemas requirieron de un aporte de energía superior para producir el mismo nivel de energía que los sistemas convencionales [13]. También puede mejorar el balance de nitrógeno de los sistemas [21] y el contenido de carbono orgánico del suelo [25]. Además, estos sistemas promueven la agrobiodiversidad [21], requieren menos pesticidas [25] y disminuyen la presión ambiental [13].

G) Diversificación

Entre los beneficios medioambientales que presenta se encuentran la menor generación de emisiones netas de gases de efecto invernadero [24, 41, 54] (pueden emitirse más gases que en el monocultivo, pero cultivos alternativos como el maíz o el trigo muestran una mayor retención del carbono del suelo frente al monocultivo de soja, y viceversa [9, 25]), un mejor índice de salud del suelo [6, 9] debido a la disminución en la aplicación de pesticidas [24, 25, 38, 43, 46, 55] como consecuencia de una mayor tasa de ocupación de la tierra, impidiendo esta el crecimiento de malas hierbas, y una mayor agrobiodiversidad, ya sea de cultivos [1, 46], de vegetación natural o de polinizadores del ecosistema [6]. En Salembier et al. (2016) destacan la diversificación y la prolongación de las rotaciones (frente al cultivo principalmente de soja) por su capacidad de evitar el desarrollo de especies tolerantes al glifosato. Por el contrario, también se dan casos donde la diversificación fomenta la aparición (o reaparición) de malas hierbas asociadas a los cultivos introducidos [9].

Asimismo, el hecho de que, con la misma superficie de plantación, riego y cantidades de fertilizantes, el rendimiento del algodón junto con el rendimiento de la remolacha azucarera sea superior (frente al monocultivo de algodón en este caso), da lugar a una eficiencia superior tanto del uso del agua como del uso de los fertilizantes [4]. El consumo de agua de riego también puede verse minorado [9, 46, 54, 55], así como el de energía [24, 41]. Por otra parte, en los casos en los que se desea intensificar la producción agrícola, la diversificación con otro tipo de cultivo presenta mejores resultados que la rotación con otra variedad del mismo cultivo [12]. Por ejemplo, la rotación de arroz *Aman* con leguminosas incrementó la eficiencia en el uso de nitrógeno y potasio, al tiempo que generó una huella parcial de gases de efecto invernadero (GEI) menor que la de las rotaciones entre las variedades *Aman* y *Boro* [7].

Los efectos de las leguminosas en la fijación biológica del nitrógeno en el suelo, con la consecuente mejora de la fertilidad y del contenido de materia orgánica [55] del mismo, se

ensalzan en repetidas ocasiones, ya que reduce la necesidad de fertilizantes nitrogenados [12, 23, 41, 42, 43, 46, 56, 60] y, con ello, el consumo de energía [23], de combustible [43], de recursos en general [54], las emisiones de GEI [7, 56, 60], el riesgo de lixiviación de nitratos [43, 56] y el riesgo de erosión del suelo [54], suponiendo todo esto una reducción de la ecotoxicidad medioambiental de los sistemas diversificados [54]. La introducción de leguminosas también repercute positivamente en la producción de contenido proteico, lo que produce sinergias entre los sistemas de cultivo y de ganadería [42, 43, 46]. Adicionalmente, la capacidad de aprovechar la radiación incidente que otros cultivos, como los cereales, no pueden capturar en suelos poco fértiles, permite un aumento del rendimiento de las explotaciones sin que los cultivos tengan que competir por los recursos presentes en el suelo [51]. No obstante, cabe señalar que la lixiviación de nitrógeno no depende tanto del cultivo de leguminosas, sino del momento en el que se plantan. Así, cuando se produce una asincronía entre la demanda de nitrógeno por parte de los cultivos y la aportación de fertilizantes nitrogenados, se incrementa el riesgo de lixiviación [41]. Esto puede solventarse con la siembra de cultivos de cobertura o de cultivos tempranos [60].

H) Labranza reducida

Entre sus ventajas se encuentran la generación de un mayor contenido de energía en grano, así como un potencial de calentamiento global (GWP) [17] y unas emisiones de GEI escaladas por rendimiento (YSE) inferiores. Esto último puede deber al mayor rendimiento de los cultivos que empleaban labranza reducida [8]. Además, el sistema de CA rindió mejor en los indicadores mencionados que el de laboreo alternado estacional (SAT). Pese a que en CA y SAT disminuyeron los insumos energéticos, esta reducción fue mínima, puesto que el control de las malas hierbas se realizó mediante la utilización de herbicidas, frente al control manual típico de los cultivos convencionales. La dificultad de gestionar las malas hierbas bajo esta técnica sin el uso de herbicidas es una preocupación frecuente [8, 9, 17, 20, 23, 24, 38].

En Krol-Badziak et al. (2021), donde la dimensión ambiental se calcula mediante el análisis ciclo de vida (LCA), todas las categorías de impacto aplicadas (el potencial de calentamiento global (GWP), el potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP), la oxidación fotoquímica (POCP), el potencial de acidificación (AP), el potencial de eutrofización (EP) y el agotamiento abiótico, combustibles fósiles (AD)) mejoraron en los sistemas de labranza reducida.

La siembra directa, combinada con la diversificación de cultivos, puede resultar en una disminución significativa del consumo de energía [9, 20]. Bajo la siembra directa también aumentó el contenido de carbono orgánico en el suelo y el nivel de humedad del mismo [20]. Sin embargo, esta técnica puede requerir de altas cantidades de fertilizantes nitrogenados sintéticos para alimentar a los cultivos [23]. Por otro lado, este manejo puede incrementar el riesgo de compactación del suelo [57] y comprometer la fertilidad fosfo-potásica del mismo.

I) Gestión eficiente del riego

Una práctica alternativa al riego por inundación continua (CF) es el riego intermitente (AWD). Una consecuencia directa del mismo es el ahorro de agua que, gracias al desarrollo de las raíces y el acceso al agua y los nutrientes a un nivel más profundo en el perfil del suelo que provoca

esta técnica, permite mantener e incluso aumentar los rendimientos, incrementando así la productividad del agua. En cuanto a las emisiones de GEI, el AWD mitigó las emisiones de CH₄, dado que durante los periodos secos disminuye la actividad metanogénica y metanotrófica, al tiempo que aumenta el suministro de oxígeno. Un efecto negativo observado del AWD es una emisión acumulada de N₂O mayor que en el caso de la CF, ya que implicó un cambio a condiciones más aeróbicas y podría haber acelerado la nitrificación y la producción de NO₃ [2]. No obstante, la técnica AWD mitigó el potencial de calentamiento global en un 45%-90% frente a la CF (Mohapatra et al., 2023). Otro manejo cuyo fin es la optimización del agua es el riego por goteo [14, 34]. No obstante, la transición a este modelo de irrigación puede conllevar la especialización de las explotaciones, al no adaptarse todos los cultivos a este tipo de sistemas [19]. Asimismo, pueden no generar una diferencia significativa en lo que al estrés hídrico se refiere [19]. En otros casos, como el del cultivo de tomate en Egipto, todos los indicadores medioambientales mejoran en los sistemas por goteo frente al riego por surcos (menores emisiones de N₂O, mayor eficiencia tanto en el uso del agua como en el de los fertilizantes, menores consumo de energía y lixiviación de nitratos) [34].

Finalmente, cuando la diferencia fundamental entre sistemas se centra en la intensificación a través de regadío, podemos observar cómo los sistemas de secano mejoran la gestión del fósforo (dado que las semillas proteaginosas son más ricas en fósforo que las de cereal), la calidad del agua, la cantidad de energía y agua, y la protección de la biodiversidad (menos operaciones de cultivo perturbadoras), mientras rebajan el riesgo de aparición de malas hierbas (dado que no se centran en la producción de soja, que tiene una baja competitividad con estas). Por su parte, los sistemas de regadío gestionaron de manera más eficiente el contenido de materia orgánica del suelo, al ser más productivos tanto en biomasa de grano cosechado como en biomasa residual [59].

J) Cultivos de cobertura

Uno de los beneficios mayormente experimentados ante la presencia de cultivos de cobertura es la disminución de la necesidad de emplear pesticidas para el control de las malas hierbas [1, 12]. Por otro lado, la siembra de cultivos de cobertura durante el invierno, frente a la opción de dejar la tierra en barbecho incrementó las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ derivadas del uso de maquinaria agrícola que emplea combustibles fósiles. No obstante, la disminución de las emisiones de N₂O, asociada con la mineralización de la materia orgánica del suelo, junto con el balance positivo de carbono en el suelo generado por los cultivos de cobertura, compensaron dicho aumento, lo que condujo a una reducción global en las emisiones de GEI [1]. Además, la cobertura, ya sea a través de cultivos o mediante acolchado, tiene potencial de reducción del impacto negativo de las precipitaciones extremas sobre el suelo [9], atenuando el riesgo de erosión de este [23].

3.2.2 Dimensión económica

Si bien se trata de la segunda dimensión con mayor número de evaluaciones (51), es la dimensión que arroja los resultados internos más contradictorios. Así, empeora en el 25'5% de los estudios, y permanece constante en el mismo porcentaje, mejorando algo menos de la mitad

de las ocasiones (49%). En las próximas líneas se explican dichas contradicciones, así como algunas de sus causas.

A) Sistemas de bajos insumos

La sustitución de PPP, al requerir de elevadas inversiones de capital iniciales [10, 31] para la instalación de las estructuras de protección, puede dar lugar a que los costes superen a los ingresos, traducándose esto en un menor salario por hora para el agricultor [10]. Por otro lado, la menor demanda de insumos del sistema (p.e. de maquinaria y energía), especialmente si se combina con variedades resistentes a plagas y a la caída de las plantas, puede provocar una caída de los costes [28, 53]. La ausencia de pesticidas y/o de fertilizantes también puede implicar un riesgo en la estabilidad del rendimiento del cultivo [10, 50, 53, 54]. La pérdida de rendimiento puede generar una caída en el margen económico [11, 28, 45, 53] y en la ratio coste-beneficio [54]. Esto concuerda con lo obtenido en Thiollet-Scholtus et al. (2021), donde los cambios técnicos arrojan resultados negativos, mientras que la sustitución del cultivo por una variedad más resistente mejora el margen semibruto y la rentabilidad de los viñedos. No obstante, esa caída en la cantidad producida se puede ver compensada por la prima de precios de la que gozan los productos de carácter ecológico, mejorando así los beneficios de la explotación [26, 44], pero pudiendo afectar negativamente al déficit comercial [26]. Dicha compensación también puede venir por parte de la venta de los cultivos de cobertura para la producción de biogás [45]. También se encuentran experimentos donde la combinación de prácticas consigue mantener el rendimiento y el margen bruto que arrojan los sistemas convencionales [24, 49].

Aquellas explotaciones que terminan aumentando el uso de pesticidas para el control de las plagas y las malas hierbas (dado que el resto de los métodos implementados resultó insuficiente, como una mayor densidad de plantación y el arado) pueden ver incrementos en su rendimiento y en el salario percibido, pese a sufrir un incremento de los costes [31]. El uso de nanofertilizantes resultó en un rendimiento y una rentabilidad bastante superiores, pese a ser más caro que el fertilizante químico [34]. Cuando uno de los objetivos en el diseño de sistemas alternativos es el mantenimiento o incremento de la rentabilidad económica, esta resulta perfectamente alcanzable [39]. No obstante, esto suele venir acompañado de un incremento del riesgo de endeudamiento, junto con una inversión inicial que numerosos agricultores no están dispuestos a efectuar [39]. Asimismo, cabe señalar que hay sistemas LI que dependen de subvenciones para elevar su margen neto [50], mientras que la dependencia de insumos externos a la región se ve reducida [26, 54].

B) Agricultura orgánica

Uno de los factores económicos favorables a la producción orgánica es la disposición a pagar una mayor prima de precio por este tipo de productos. De este modo, aunque los rendimientos disminuyan bajo este sistema [10, 22, 27, 40], puede que el salario por hora del agricultor experimente un crecimiento [10]. Operar bajo este sistema también puede suponer mayores costes de producción [22]. Asimismo, la selección de una variedad resistente a las plagas resulta determinante a la hora de implementar la OA tanto para mantener tanto el rendimiento

como los beneficios [27]. La agricultura orgánica también puede mostrarse resistente a la volatilidad de los precios [47].

Si la práctica predominante es la utilización de fertilizante orgánico, los ingresos netos pueden experimentar un aumento, especialmente cuando el fertilizante se genera dentro de la propia granja, lo que ayuda a su vez a reducir la probabilidad de endeudamiento de las explotaciones [36].

C) Agricultura de conservación

Los costes pueden no diferir en cantidad de los de los sistemas convencionales, pero sí en productos y servicios adquiridos. Además, el potencial de rendimiento de la CA puede ser mayor, dadas las mejores calidades del laboreo del suelo (presencia de menos terrones), de la siembra (distribución de semillas uniforme) y de la fertilización [18]. En otras ocasiones, si bien el rendimiento de los sistemas CA es inferior, los menores costes de mecanización pueden compensar parcialmente la caída del producto bruto, dando lugar a márgenes semi-netos similares [33]. Una particularidad puesta de manifiesto en Adeux et al. (2022) es que los sistemas que implementan solo un pilar de la CA (labranza cero, exceptuando una operación de laboreo superficial) no difieren en rendimiento de las explotaciones convencionales, mientras que los que realizan las tres prácticas de la CA sí que sufren una disminución del mismo. También encontramos casos en los que los CA resultan en un margen de beneficio igual o superior, a costa de grandes inversiones a largo plazo [57] y, con ellas, de un mayor riesgo para los agricultores [37].

D) Gestión Integrada de Plagas

Una investigación llevada a término en cuatro países europeos obtuvo como resultado un nivel de rendimiento similar al de los sistemas convencionales, junto con el mantenimiento de los ingresos por ventas, si bien los costes del control de plagas se vieron incrementados, especialmente en el caso del enmallado de los huertos. Se señala que estos costes podrían verse compensados por una prima de precio sobre estos productos [35]. En otros casos, al reducirse la cantidad de fertilizantes, pesticidas y el número de operaciones de laboreo, los costes se ven significativamente reducidos, aunque también el rendimiento experimentó la misma tendencia [40]. Aunque los costes de producción se rebajen, puede suceder que la elevada inversión inicial precisada para la adquisición de equipos y tecnologías como pulverizadores de precisión, sistemas de soporte a la decisión [DSS] y/o modelos de previsión y detección temprana dificulte su viabilidad, pese a que los beneficios económicos sean similares a los de los sistemas convencionales [48].

E) Sistemas agroecológicos

La agroecología puede afectar positivamente a la productividad por superficie agraria media utilizada (UAA), a los ingresos de la actividad agrícola, no solo por incrementándolos, sino también diversificando las fuentes de los mismos, consiguiendo de esta forma mantenerlos estables y disminuyendo los costes variables a consecuencia de la reducción de pesticidas, a la necesidad de mano de obra externa en algunas explotaciones [14] y a la dependencia de insumos externos al tener ciclos productivos más circulares [6, 23, 25, 54]. No obstante,

también se dan resultados opuestos, pues el coste de los productos de biocontrol (más caros que los productos químicos), la inversión en herramientas específicas, el incremento en las fluctuaciones del rendimiento [15] y los mayores costes de comercialización [30] pueden minorar los beneficios económicos.

F) Integración cultivo-ganado

Si atendemos a los beneficios económicos netos del sistema completo (compuesto por el subsistema ganadería y el subsistema cultivos y hortalizas), este es considerablemente superior para los ICLS, debido al mayor valor económico de la ganadería y las hortalizas con respecto a los cultivos [13]. También pueden presentar una mayor resistencia a las fluctuaciones en los precios de los productos comercializados, como resultado de la diversificación [21].

G) Diversificación

Esta práctica ofrece frecuentemente resultados económicos positivos, generalmente ligados al mayor rendimiento [55] de las explotaciones diversificadas. Esto se debe o bien a la inclusión de un cultivo adicional dentro de la misma temporada de cultivo [1, 4] o a la sustitución del barbecho o de un ciclo del mismo cultivo por un cultivo alternativo, lo que puede generar incrementos en el margen bruto [1, 43, 51, 56] y en los beneficios económicos [4, 42], una productividad más estable, con la disminución del riesgo que esto implica [1, 41, 42, 51]. Sin embargo, un determinante fundamental de los efectos de la diversificación sobre la rentabilidad es el valor añadido bajo contrato del cultivo inicial y de los cultivos adicionales. Así, cuando el cultivo de diversificación tiene un mayor VA bajo contrato, el incremento de la rentabilidad está garantizado; mientras que si los cultivos iniciales tienen un alto VA, la rentabilidad se ve comprometida [9, 12, 25, 41, 42, 55, 56, 58, 60]. Las variaciones en la producción de energía alimentaria también dependen de las diferencias en el contenido de energía entre los cultivos de partida y los cultivos introducidos en la diversificación [9], como sucede en Alletto et al. (2022), donde se sustituyen cereales (especialmente el maíz) por otros cultivos como la colza, el girasol o la zanahoria. La introducción de leguminosas también reportó una mayor ratio beneficio-coste [54], tanto frente al monocultivo como a la intensificación con el mismo cultivo [7]. Puede suceder, debido tanto a la pérdida de rendimiento como a los menores precios de venta, que el margen bruto disminuya. No obstante, si se incluyen en el cálculo las percepciones de ayudas para promover medidas agroambientales-climáticas, los márgenes brutos pueden superar a los de los sistemas convencionales [60]. La percepción de estos sistemas como más sostenibles tanto desde el punto de vista de los clientes como de los proveedores favorece la introducción de estos productos en las cadenas comerciales [58].

No obstante, hay que tener en cuenta que los sistemas convencionales generalmente tienen como objetivo la maximización del beneficio, no pudiéndose superar su rendimiento económico en todas las ocasiones [38].

H) Labranza reducida

Entre los resultados económicos ofrecidos por esta técnica podemos encontrar aumentos en los rendimientos, a la par que reducciones en los costes totales de producción, de labranza y de establecimiento del cultivo; resultando esto en un incremento de los beneficios totales y una

mayor ratio valor-coste [8]. En otras ocasiones, pese a verse también minorados los costes al suprimir la labranza, un menor rendimiento de la tierra [17, 24, 38] o un incremento de los costes derivado de la mayor necesidad de productos de protección de plantas [20, 24] puede reducir el margen bruto. De esta forma, no es extraño encontrar análisis donde la rentabilidad no varía con respecto a los sistemas de arado profundo [23]. Los sistemas alternativos a los convencionales parecen tener una mayor dependencia de los subsidios [17]. Por último, la siembra directa parece ofrecer una mayor estabilidad en el rendimiento de la tierra y, consecuentemente, de los ingresos [20].

I) Gestión eficiente del riego

Mohapatra et al. (2023) muestran cómo el riego intermitente conlleva menores costes de producción, una mayor ratio beneficio-coste y una eficiencia productiva y monetaria superior que las prácticas convencionales de los agricultores [2]. En cuanto al riego por goteo, este puede conllevar un riesgo mayor al disminuir la diversificación de los cultivos [19]. Además, la transición a estos sistemas está considerablemente subvencionada [19]. No obstante, el riego por goteo puede incrementar considerablemente el rendimiento de la tierra (pues aplicando los insumos sobre las raíces reduce las pérdidas y mejora la fotosíntesis), impactando positivamente en los beneficios [34]. Los sistemas de secano, con menor dependencia económica, arrojaron unos beneficios económicos inferiores [59].

J) Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura pueden impactar negativamente en los criterios económicos como el margen bruto, el rendimiento del capital circulante y el riesgo económico, debido a que no proporcionan rendimientos a corto o medio plazo [1]. En Cano et al. (2023), la presencia de cultivos de cobertura no solo afectó al rendimiento inicial, sino que minoró los rendimientos del maíz de ciclos posteriores. La aplicación de estos cultivos también puede implicar una subida de los costes mecánicos del proceso [12].

3.2.3 Dimensión social

Podemos apreciar que se trata, considerablemente, del ámbito menos analizado, pues solo se ha puesto el foco en él en poco más de la mitad de la literatura (33 investigaciones de 60). No obstante, los sistemas alternativos parecen impactar positivamente en las consideraciones sociales (48'5%) y, de no hacerlo, tienden a mantenerse (33'3%). Un elemento de interés sobre la valoración social de los sistemas de cultivo es el enfoque que se le confiere al factor trabajo. Así pues, en ciertas ocasiones el incremento del trabajo se valora positivamente [6], mientras que en otras investigaciones esto se considera un problema. Asimismo, es destacable el hecho de que se trata de la dimensión con menos criterios evaluados, y con menos frecuencia de aparición (p.e., la calidad de los productos y la dependencia comercial solo se mencionan en un artículo). A continuación, se explican los principales determinantes de los impactos económicos (de la A a la I, excluyendo la F):

A) Sistemas de bajos insumos

Generalmente, el riesgo de toxicidad humana cae en estos sistemas [26, 45, 49, 53], aunque este factor depende de los ingredientes activos de los tratamientos aplicados, pues pueden ser más nocivos que los pesticidas convencionales [16]. Además, todas las operaciones que requieren la transición a los sistemas de bajos insumos, junto con los procesos organizativos, supusieron una penosidad del trabajo considerable [16], así como una mayor complejidad de gestión de este [31, 44, 45, 49, 50]. No obstante, el requerimiento de mano de obra [44, 45, 49, 53] favorece el empleo rural [26, 31] lo que, si viene acompañado de incrementos en el rendimiento, supone una mejora de la productividad laboral [31]. El nivel educativo de los miembros de las explotaciones que sustituyeron el fertilizante químico por nanofertilizantes era superior [34]. El trabajo suele reportar una mayor gratificación en los sistemas alternativos [53].

B) Agricultura orgánica

El uso de sustancias como el cobre eleva el riesgo de toxicidad humana [22]. No obstante, si la labranza reducida se combina con rotaciones diversificadas de cultivos, el riesgo para la salud puede reducirse [23]. En este mismo caso, la demanda de mano de obra es superior (más cultivos), así como la dificultad para gestionar estos sistemas [23]. En otras ocasiones, la cantidad de trabajo requerida no varía [47].

Asimismo, las familias que ponen en marcha iniciativas orgánicas suelen tener una mayor actividad en las actividades sociales del pueblo [36].

C) Agricultura de conservación

Al reducir la labranza, tanto la necesidad de mano de obra como la penosidad del trabajo disminuyeron [18]. Cuando las inversiones para poner en práctica la CA son elevadas, la acogida de estas prácticas es más complicada, especialmente si los agricultores no son los propietarios de la tierra [37].

D) Gestión Integrada de Plagas

Tanto el riesgo sobre la salud de los agricultores como la satisfacción con la distribución del trabajo mejoraron en los sistemas IPM. Por otra parte, el requerimiento de conocimiento técnico y la prima de precio sobre los productos IPM, derivada de su calidad superior, dificulta la aceptación de este tipo de sistemas en determinadas regiones, donde escasean las redes de apoyo y formación [48].

E) Sistemas agroecológicos

Uno de los resultados más destacados de los sistemas agroecológicos es la mayor diversidad y seguridad alimentaria [6, 14] que proporcionan, debido fundamentalmente a la diversificación. También puede suceder que la carga de trabajo disminuya, ampliando la disponibilidad de tiempo de los trabajadores de la explotación. Si esto viene acompañado de mayores ingresos, la remuneración de los trabajadores se ve incrementada [14]. La agroecología también favorece las interacciones con la sociedad, entendidas en términos de empleo, aceptabilidad de las prácticas agrarias, valor social del paisaje circundante [15] y mayor acceso a las redes tanto de crédito como de apoyo técnico [30].

G) Diversificación

La relevancia a nivel social de la diversificación varía en función de las condiciones socioeconómicas del país o región analizado. Así, los países menos desarrollados suelen verse más favorecidos por esta práctica, ya que no solo incrementa la diversidad alimentaria [54], sino que también fomentan el trabajo rural.

La cantidad de trabajo suele verse incrementada bajo estos sistemas [12, 24] (a no ser que se combine con otras prácticas como la reducción de la labranza, donde entonces el trabajo total requerido puede hasta disminuir [41]), así como su complejidad [23, 41, 46]. También parece encontrarse una diferencia entre los experimentos ex ante y los experimentos ex post, pues en los primeros la cantidad de trabajo requerida se estima menor [42, 43, 46].

H) Labranza reducida

Cuando la labranza reducida se sirve de herbicidas para eliminar las malas hierbas, requiere de una menor mano de obra [17, 20, 24] lo que, unido a un mayor rendimiento, eleva la productividad laboral [8]. No obstante, la utilización de este tipo de productos conlleva un riesgo para la salud superior [17, 23]. Si bien los sistemas de labranza convencional resultan más complejos como resultado del número de operaciones y de la maquinaria necesaria para el arado, los sistemas de labranza cero presentan más dificultades en su gestión, requiriendo de un mayor conocimiento para la colocación óptima de las semillas, del fertilizante y la protección de las plantas, entre otros [17, 23].

I) Gestión eficiente del riego

El riego por goteo puede incrementar el número de trabajadores contratados y, al tiempo, reducir el número de horas de trabajo del gestor de la explotación. Esto se debe a la transición hacia sistemas especializados con una mayor superficie cultivada. Estos cultivos, fundamentalmente destinados a la exportación, adolecen de una dependencia de los contratos comerciales superior a la de los sistemas por riego de superficie [19]. En otras ocasiones, simplemente requieren de menos mano de obra que en los sistemas de riego por surcos, al omitirse todas las operaciones de construcción y operación [34]. A su vez, el nivel de formación de los gestores de este tipo de explotaciones suele ser mayor, de ahí su preocupación por la escasez de agua, la contaminación y la protección de los recursos naturales [34].

3.2.4 Sostenibilidad global

Pese a haber sido estimada para 42 de los 60 documentos incluidos en la presente SLR, se trata de un aspecto difícil de establecer, al tratar de incorporar las tres dimensiones previas. Así pues, cuando dos dimensiones indicaban la misma dirección, se ha decidido establecer esta, siempre teniendo en cuenta la intensidad de la tercera. Es decir, si lo económico y lo social empeoran significativamente, y lo ambiental mejora ligeramente, se establece un empeoramiento ligero. Los resultados van en línea con nuestra hipótesis de investigación, pues la sostenibilidad de los sistemas alternativos mejora en un 83'3% de las investigaciones, empeorando tan solo en dos situaciones, y manteniéndose constante en cinco.

4. Discusión

El primer resultado de la SLR a relucir es la escasez de investigaciones (60 en total) que evalúan la sostenibilidad de los sistemas de cultivo alternativos a los convencionales mediante MCA, aunque cabe señalar que hay un número considerable de estudios que realizan MCDA. A su vez, resulta más preocupante que solo 33 de estos artículos hayan analizado algunas cuestiones sociales.

4.1. Contradicciones entre la sustentabilidad ambiental y económica de los manejos alternativos

Si atendemos a los trade-offs entre dimensiones, uno de los resultados más frecuentes es la disputa entre los objetivos ambientales y los económicos [7, 9, 11, 52, 58, 59]. No obstante, también los objetivos sociales se enfrentan en ocasiones a los demás [9, 58]. De esta forma, aparecen investigaciones que, estudiando los efectos de la diversificación en tres países, llegan a tres resultados distintos: una situación donde empeora el aspecto medioambiental y se incrementan los beneficios económicos, un experimento donde sucede lo contrario, y un tercero en el cual todas las dimensiones se ven favorecidas [58]. Esto pone de manifiesto la relevancia no solo de las prácticas, sino también de los factores naturales (p.e. tipo de suelo, clima, disponibilidad de agua, ...), locales y regionales (canales comerciales, disposición a pagar primas de precio superiores, redes de apoyo, etc.).

Sin embargo, antes de detallar las contradicciones surgidas en los sistemas alternativos, no puede perder de vista la siguiente observación: los trade-offs entre dimensiones también tienen lugar en los sistemas convencionales, solo que inversamente, siendo los aspectos medioambientales los perjudicados en detrimento de la maximización de los beneficios económicos [56]. En otros sistemas los trade-offs son una cuestión del plazo evaluado: los monocultivos actuales, de alto valor económico, degradan la calidad del suelo a un ritmo acelerado, derivando así en una pérdida de la fertilidad del suelo. La transición hacia sistemas diversificados fertilizados con abono verde es necesaria para mantener los beneficios a largo plazo, aunque estos disminuyan inicialmente [55].

En los experimentos en los que la prioridad absoluta es la eliminación de los pesticidas (ya sean herbicidas, plaguicidas o ambos), se observa una disminución tanto del rendimiento en términos de cantidad (se incrementa la tasa de desperdicio) como del margen económico [11]. Sin embargo, si la disminución de insumos se aborda desde una perspectiva integral, modificando no solo aspectos técnicos, sino también organizacionales (herramientas de decisión) y estructurales (sustitución de variedades por algunas más robustas y disminución del número de ciclos entre replantaciones), es posible alcanzar una reducción en el impacto ambiental al tiempo que se refuerzan los resultados económicos [16, 27, 52]. Por otro lado, hay investigaciones que muestran que puede reducirse el impacto medioambiental (aunque no en la misma medida en la que podría hacerse si se aplicaran cambios drásticos) al tiempo que se

mantienen las cuestiones económicas y sociales, siempre que las prácticas se pongan en marcha de manera gradual. A su vez, el mismo estudio concluye que, para abordar de manera efectiva la reducción de herbicidas, es necesaria la combinación de varios manejos alternativos (p.e. diversificación y labranza reducida), y que no es recomendable sustituir unos por otros [38].

Hay ocasiones en la que se demuestra que dicha contradicción es superable, siempre que los manejos tengan algún tipo de uso o repercusión alternativa. Por ejemplo, en Pelzer et al. (2017), donde se diseñan sistemas de bajos insumos para tres países diferentes, se señala que en aquellos lugares y escenarios donde los cultivos de cobertura se venden para usos relacionados con el biogás, la rentabilidad económica se mantiene. Lo mismo sucedería en Law et al. (2021) si la producción forraje como estrategia de diversificación se combinase con la práctica de integración de cultivos y ganado.

Finalmente, cabe señalar que los trade-offs no solo se producen entre dimensiones, sino también dentro de las mismas. Así, nos encontramos experimentos donde se incrementa el uso de pesticidas mientras que se reduce el riesgo de erosión del suelo [18], o donde los ingresos son más estables y los beneficios de la explotación menores [20].

4.2 Tendencias generales de los sistemas y las prácticas

La diversificación, tanto como manejo aislado como dentro de sistemas más amplios como los IPM [47], destaca como práctica en todas las dimensiones, resultando verdaderamente efectiva en el control de malas hierbas, enfermedades fúngicas y plagas [46], salvo en determinadas excepciones [9, 58]. Especialmente, la diversificación con leguminosas reporta numerosos beneficios, ligados a su potencial de fijación de nitrógeno en el suelo, lo que no solo disminuye el riesgo de emisión de óxido nitroso con respecto a cultivos como los cereales, la colza y las praderas, sino que también permite reducir el uso de fertilizantes en los cultivos posteriores al tiempo que aumenta su rendimiento [56]. En lo que respecta a las cuestiones económicas, si bien factores como el riesgo se ven mayoritariamente reducidos bajo esta práctica [25, 41, 42, 51], la rentabilidad de las explotaciones varía fundamentalmente en función del precio de mercado de las nuevas especies cultivadas. Finalmente, la mano de obra requerida no ofrece resultados concluyentes.

Las técnicas de gestión eficiente del agua parecen mejorar todos los criterios ambientales, siendo generalmente rentables (pese a poder generar una ligera dependencia de los subsidios concedidos para fomentar la transición), aunque también presentan contradicciones a nivel social, especialmente en lo que a trabajo se refiere.

Los sistemas de integración cultivo-ganado no parecen presentar trade-offs entre lo ambiental y lo económico, consiguiendo mejoras en ambos aspectos. Sin embargo, la productividad laboral puede caer a consecuencia de un menor número de operaciones mecanizadas [13].

Por su parte, la labranza reducida presenta un serio problema a la hora de gestionar la presencia de malas hierbas. Cuando se acaba recurriendo a productos químicos de protección de plantas, se incrementan el riesgo ecotoxicológico y los riesgos para la salud humana y, en el caso de no hacerlo, es altamente probable que el rendimiento se vea mermado [17, 24, 38]. Estos

resultados ambientales también se observan en la agricultura de conservación, seguramente a consecuencia de esta práctica.

Si hay un factor que comparten la práctica totalidad de los sistemas y manejos alternativos es su mayor complejidad, tanto en la adaptación a las nuevas máquinas y procesos, como en la organización de las nuevas operaciones y en el enfrentamiento a los retos que puedan surgir. Adicionalmente, muchos de los sistemas operativos presentan la necesidad de efectuar elevadas inversiones iniciales, por lo que pueden considerarse poco viables para los agricultores [10, 15, 39, 48, 57]. Así pues, para el inconveniente del incremento de la complejidad de implantación y operatividad de estos sistemas, se generan propuestas como el apoyo en las cooperativas agrícolas tanto para las inversiones en maquinaria como para la gestión de las explotaciones, pudiendo acceder de esta forma no solo a redes técnicas de apoyo, sino también a canales comerciales más favorecedores [8, 13, 15, 44].

5. Conclusión

La revisión presentada en estas páginas no solo ha dedicado sus esfuerzos a responder a la pregunta de investigación, sino que, yendo un paso más allá, ha pretendido identificar los sistemas y las prácticas alternativas más prósperas en tres de las dimensiones de la sostenibilidad.

Si bien esta SLR incorpora un número suficiente de artículos para ser considerada una revisión consistente, podemos advertir que todavía hay margen para la proliferación de este tipo de estudios, dado el potencial de las técnicas de evaluación multicriterio. No obstante, es importante recordar que la dimensión social acostumbra a quedar relegada a un segundo plano, incluso es las pocas ocasiones que es analizada, por lo que urge incorporarla en los exámenes venideros.

En relación con los sistemas y prácticas ecológicas, son destacables la diversificación de cultivos, los métodos de riego eficiente y los sistemas que integran cultivos y ganado, por sus impactos generalmente positivos tanto en lo económico como en lo ambiental. Por el contrario, la labranza reducida y la labranza directa presentan serias dificultades que no solo empeoran los efectos de la producción sobre el medio ambiente, sino que también impactan negativamente sobre el rendimiento y los beneficios económicos. Sin embargo, se ha visto que, si estos manejos se realizan juntamente con la diversificación, los resultados cambian de dirección, presentándose este como una estrategia con potencial a todos los niveles. Por su parte, es más complejo establecer una trayectoria en los impactos de los sistemas que en los de las prácticas aisladas, como consecuencia de que los primeros son una combinación de las últimas.

Un resultado constantemente de manifiesto es la escasez de formación a la hora de iniciar la transición hacia sistemas más sostenibles. De este modo, nos encontramos con ocasiones en las que las explotaciones continúan gestionándose de la misma forma bajo prácticas alternativas, por lo que no es posible aprovechar todo el potencial de estos manejos [19]. También se señala

recurrentemente la necesidad de ayuda financiera para el equipamiento específico que requieren algunas prácticas alternativas, ya sea mediante el fomento del acceso al crédito, o a través de subsidios. Se demanda, por lo tanto, una mayor implicación política en el fomento de las estrategias sostenibles [12, 15, 42].

Finalmente, la revisión concluye que sí existe margen para la mejora de la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola actuales (pues así lo hacen en un 83% de las ocasiones), siempre que participen en la transición todos los grupos de interés que puedan verse afectados, diseñando cuidadosamente las estrategias en función de las especificidades agronómicas y socioeconómicas de la región.

Referencias

- Adeux, G., Guinet, M., Courson, E., Lecaulle, S., Munier-Jolain, N., & Cordeau, S. (2022). Multicriteria assessment of conservation agriculture systems. *Frontiers in Agronomy*, 4. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.999960>
- Alletto, L., Vandewalle, A., & Debaeke, P. (2022). Crop diversification improves cropping system sustainability: An 8-year on-farm experiment in South-Western France. *Agricultural Systems*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103433>
- Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2020). An integrated multi-criteria analysis for assessing sustainability of agricultural production at regional level. *Information Processing in Agriculture*, 7(2). <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.005>
- Brandt, P., Ernst, A., Gralla, F., Luederitz, C., Lang, D. J., Newig, J., Reinert, F., Abson, D. J., & Von Wehrden, H. (2013). A review of transdisciplinary research in sustainability science. En *Ecological Economics* (Vol. 92). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.008>
- Brundtland, H. (1987). Informe Brundtland - Wikipedia, la enciclopedia libre. En *Onu*.
- Cano, P. B., Cabrini, S. M., Peper, A. M., & Poggio, S. L. (2023). Multi-criteria assessment of cropping systems for the sustainable intensification in the Pampas. *Agricultural Systems*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103723>
- Carof, M., Colomb, B., & Aveline, A. (2013). A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. *AGRICULTURAL SYSTEMS*, 115, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.09.011>
- Craheix, D., Bergez, J.-E., Angevin, F., Bockstaller, C., Bohanec, M., Colomb, B., Dore, T., Fortino, G., Guichard, L., Pelzer, E., Messean, A., Reau, R., & Sadok, W. (2015). Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks

- from the DEXi decision support system. *AGRONOMY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, 35(4), 1431-1447. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0315-0>
- Cunha, M. C., Serpa, D., Marques, J., Keizer, J. J., & Abrantes, N. (2023). On sustainable improvements of agricultural practices in the Bairrada region (Portugal). *Environment, Development and Sustainability*, 25(3), 2735-2757. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02155-3>
- De Luca, A. I., Molari, G., Seddaiu, G., Toscano, A., Bombino, G., Ledda, L., Milani, M., & Vittuari, M. (2015). Multidisciplinary and innovative methodologies for sustainable management in agricultural systems. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(7). <https://doi.org/10.30638/eemj.2015.169>
- De Olde, E. M., Oudshoorn, F. W., Sørensen, C. A. G., Bokkers, E. A. M., & De Boer, I. J. M. (2016). Assessing sustainability at farm-level: Lessons learned from a comparison of tools in practice. *Ecological Indicators*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.047>
- Deytieux, V., Munier-Jolain, N., & Caneill, J. (2016). Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. *EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY*, 72, 107-126. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.10.005>
- Gesan-Guiziu, G., Alaphilippe, A., Aubin, J., Bockstaller, C., Boutrou, R., Buche, P., Collet, C., Girard, A., Martinet, V., Membre, J.-M., Sabbadin, R., Thiollet-Scholtus, M., & van der Werf, H. M. G. (2020). Diversity and potentiality of multi-criteria decision analysis methods for agri-food research. *AGRONOMY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, 40(6). <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00650-3>
- Hacking, T., & Guthrie, P. (2008). A framework for clarifying the meaning of Triple Bottom-Line, Integrated, and Sustainability Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(2-3). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.03.002>
- Król-Badziak, A., Pishgar-Komleh, S. H., Rozakis, S., & Książak, J. (2021). Environmental and socio-economic performance of different tillage systems in maize grain production: Application of Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Making. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123792>
- Law, E. P. (2021). *Assessing the Sustainability of Intermediate Wheatgrass as a Perennial Grain and Forage Crop*.
- Li, Y., Sun, Z., Accatino, F., Hang, S., Lv, Y., & Ouyang, Z. (2021). Comparing specialised crop and integrated crop-livestock systems in China with a multi-criteria approach using the emergy method. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127974>
- Liang, Z., van der Werf, W., Xu, Z., Cheng, J., Wang, C., Cong, W.-F., Zhang, C., Zhang, F., & Groot, J. C. J. (2022). Identifying exemplary sustainable cropping systems using a positive deviance approach: Wheat-maize double cropping in the North China Plain. *AGRICULTURAL SYSTEMS*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103471>

- Linnenluecke, M. K., Marrone, M., & Singh, A. K. (2020). Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. En *Australian Journal of Management* (Vol. 45, Número 2). <https://doi.org/10.1177/0312896219877678>
- Mazzetto, F., & Bonera, R. (2003). MEACROS: a tool for multi-criteria evaluation of alternative cropping systems. *EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY*, 18(3-4), 379-387. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00127-2)
- Mohapatra, K. K., Nayak, A. K., Patra, R. K., Tripathi, R., Swain, C. K., Moharana, K. C., Kumar, A., Shahid, M., Mohanty, S., Garnaik, S., Nayak, H. S., Mohapatra, S., Nagothu, U. S., & Tesfai, M. (2023). Multi-criteria assessment to screen climate smart rice establishment techniques in coastal rice production system of India. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1130545>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. En *PLoS Medicine* (Vol. 6, Número 7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mouratiadou, I., Wezel, A., Kamilia, K., Marchetti, A., Paracchini, M. L., & Bàrberi, P. (2024). The socio-economic performance of agroecology. A review. En *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 44, Número 2). <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00945-9>
- Parra-López, C., Calatrava-Requena, J., & de-Haro-Giménez, T. (2008). A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an AHP-extended framework. *Ecological Economics*, 64(4), 820-834. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.004>
- Pelzer, E., Bourlet, C., Carlsson, G., Lopez-Bellido, R. J., Jensen, E. S., & Jeuffroy, M. H. (2017). Design, assessment and feasibility of legume-based cropping systems in three European regions. *Crop and Pasture Science*, 68(10-11), 902-914. <https://doi.org/10.1071/CP17064>
- Peyraud, J. L., Taboada, M., & Delaby, L. (2014). Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review. *European Journal of Agronomy*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.02.005>
- Riviere, C., Bethinger, A., & Bergez, J.-E. (2022). The Effects of Cover Crops on Multiple Environmental Sustainability Indicators-A Review. *AGRONOMY-BASEL*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy12092011>
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J. É., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., & Doré, T. (2008). Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: Implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. En *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 28, Número 1). <https://doi.org/10.1051/agro:2007043>

- Sala, S., Farioli, F., & Zamagni, A. (2013). Progress in sustainability science: Lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment: Part 1. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9). <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0508-6>
- Salembier, C., Elverdin, J. H., & Meynard, J. M. (2016). Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. En *Ecological Indicators* (Vol. 15, Número 1). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- Thiollet-Scholtus, M., Muller, A., Abidon, C., Grignion, J., Keichinger, O., Koller, R., Langenfeld, A., Ley, L., Nassr, N., Rabolin-Meinrad, C., & Wohlfahrt, J. (2021). Multidimensional assessment demonstrates sustainability of new low-input viticulture systems in north-eastern France. *European Journal of Agronomy*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126210>
- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on Conducting a Systematic Literature Review. En *Journal of Planning Education and Research* (Vol. 39, Número 1). <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>

ANEXO 1. FORMULARIO DE EXTRACCIÓN DE DATOS

1. País analizado
2. Objetivos
3. Alcance
4. Tipo de cultivo
5. Metodología de producción
6. Cultivo ficticio o real
7. Fuente de datos (remotos o in-situ)
8. Resultados generales
9. Modo de producción mencionado
10. En el caso de que sea "otros", ¿cuáles?
11. Localización
12. Nivel del análisis
13. Momento de la evaluación
14. ¿Realizan comparación?
15. Si la respuesta anterior es "sí", ¿con qué?
16. ¿Cómo realizan el MCA?
17. Método o herramienta de MCA
18. Indicadores agronómicos
19. Indicadores ambientales
20. Indicadores económicos
21. Indicadores sociales
22. Resultados agronómicos general
23. Resultados ambientales general
24. Resultados ambientales detallados
25. Resultados económicos general
26. Resultados económicos detallados
27. Resultados sociales general
28. Resultados sociales detallados
29. Resultados sostenibilidad general
30. Forma común de representación de los resultados
31. Recomendaciones técnicas o políticas
32. Cuestiones de interés personal
33. Comentarios personales

ANEXO 2. DOCUMENTOS ACEPTADOS DE LA SRL

- [1] Cano, P. B., Cabrini, S. M., Peper, A. M., & Poggio, S. L. (2023). Multi-criteria assessment of cropping systems for the sustainable intensification in the Pampas. *Agricultural Systems*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103723>
- [2] Mohapatra, K. K., Nayak, A. K., Patra, R. K., Tripathi, R., Swain, C. K., Moharana, K. C., Kumar, A., Shahid, M., Mohanty, S., Garnaik, S., Nayak, H. S., Mohapatra, S., Nagothu, U. S., & Tesfai, M. (2023). Multi-criteria assessment to screen climate smart rice establishment techniques in coastal rice production system of India. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1130545>
- [3] Blockeel, J., Schader, C., Heidenreich, A., Grovermann, C., Kadzere, I., Egyir, I. S., Muriuki, A., Bandanaa, J., Tanga, C. M., Clottey, J., Ndungu, J., & Stolze, M. (2023). Do organic farming initiatives in Sub-Saharan Africa improve the sustainability of smallholder farmers? Evidence from five case studies in Ghana and Kenya. *Journal of Rural Studies*, 98, 34–58. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.01.010>
- [4] Wang, X., Li, Y., Feng, H., Yu, Q., Fan, X., Liu, C., Chen, J., Yang, Z., & Biswas, A. (2023). Combining biochar with cotton-sugarbeet intercropping increased water-fertilizer productivity and economic benefits under plastic mulched drip irrigation in Xinjiang, China. *Industrial Crops and Products*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116060>
- [5] Lairez, J., Affholder, F., Scopel, E., Leudpanhane, B., & Wery, J. (2023). Sustainability assessment of cropping systems: A field-based approach on family farms. Application to maize cultivation in Southeast Asia. *European Journal of Agronomy*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126716>
- [6] Lucantoni, D., Sy, M. R., Goïta, M., Veyret-Picot, M., Vicovaro, M., Bicksler, A., & Mottet, A. (2023). Evidence on the multidimensional performance of agroecology in Mali using TAPE. *Agricultural Systems*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103499>
- [7] Emran, S. al, Krupnik, T. J., Aravindakshan, S., Kumar, V., & Pittelkow, C. M. (2022). Impact of cropping system diversification on productivity and resource use efficiencies of smallholder farmers in south-central Bangladesh: a multi-criteria analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00795-3>
- [8] Krupnik, T. J., Hossain, M. K., Timsina, J., Gathala, M. K., Sapkota, T. B., Yasmin, S., Shahjahan, M., Hossain, F., Kurishi, A., Miah, A. A., Rahman, B. M. S., & McDonald, A. J. (2022). Adapted Conservation Agriculture Practices Can Increase Energy Productivity and Lower Yield-Scaled Greenhouse Gas Emissions in Coastal Bangladesh. *Frontiers in Agronomy*, 4. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.829737>
- [9] Alletto, L., Vandewalle, A., & Debaeke, P. (2022). Crop diversification improves cropping system sustainability: An 8-year on-farm experiment in South-Western France. *Agricultural Systems*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103433>

- [10] Mathis, M., Blom, J. F., Nemecek, T., Bravin, E., Jeanneret, P., Daniel, O., & de Baan, L. (2022). Comparison of exemplary crop protection strategies in Swiss apple production: Multi-criteria assessment of pesticide use, ecotoxicological risks, environmental and economic impacts. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 512–528. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.008>
- [11] Ruesch, J., Montrognon, Y., Labeyrie, B., Codini, M., Holstalnou, E., Drusch, S., Borg, J., Plenet, D., Gallia, V., Guiraud, M., Mouiren, C., & Blanc, P. (2022). *EcoPêche 2: Conceive and evaluate innovative peach orchard management systems to reduce dependance on phytosanitary products*.
- [12] Bonnet, C., Gaudio, N., Alletto, L., Raffailac, D., Bergez, J. E., Debaeke, P., Gavaland, A., Willaume, M., Bedoussac, L., & Justes, E. (2021). Design and multicriteria assessment of low-input cropping systems based on plant diversification in southwestern France. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00719-7>
- [13] Li, Y., Sun, Z., Accatino, F., Hang, S., Lv, Y., & Ouyang, Z. (2021). Comparing specialised crop and integrated crop-livestock systems in China with a multi-criteria approach using the emergy method. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127974>
- [14] Pronti, A., & Coccia, M. (2020). Multicriteria analysis of the sustainability performance between agroecological and conventional coffee farms in the East Region of Minas Gerais (Brazil). *Renewable Agriculture and Food Systems*. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000332>
- [15] Puech, C., Brulair, A., Paraiso, J., & Faloya, V. (2021). Collective design of innovative agroecological cropping systems for the industrial vegetable sector. *Agricultural Systems*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103153>
- [16] Thiollet-Scholtus, M., Muller, A., Abidon, C., Grignon, J., Keichinger, O., Koller, R., Langenfeld, A., Ley, L., Nassr, N., Rabolin-Meinrad, C., & Wohlfahrt, J. (2021). Multidimensional assessment demonstrates sustainability of new low-input viticulture systems in north-eastern France. *European Journal of Agronomy*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126210>
- [17] Król-Badziak, A., Pishgar-Komleh, S. H., Rozakis, S., & Książak, J. (2021). Environmental and socio-economic performance of different tillage systems in maize grain production: Application of Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Making. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123792>
- [18] Xavier, J. H. V., Gomes, M. C., Anjos, F. S. dos, Scopel, E., Silva, F. A. M. da, & Corbeels, M. (2020). Participatory multicriteria assessment of maize cropping systems in the context of family farmers in the Brazilian Cerrado. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 410–426. <https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1788253>
- [19] Alonso, A., Feltz, N., Gaspart, F., Sbaa, M., & Vanclooster, M. (2019). Comparative assessment of irrigation systems' performance: Case study in the Triffa agricultural district,

NE Morocco. *Agricultural Water Management*, 212, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.033>

[20] Król, A., Księżak, J., Kubińska, E., & Rozakis, S. (2018). Evaluation of sustainability of maize cultivation in Poland. A prospect theory-PROMETHEE approach. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10114263>

[21] Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J. P., Joannon, A., & Gibon, A. (2012). Mixed crop-livestock systems: An economic and environmental-friendly way of farming? *Animal*, 6(10). <https://doi.org/10.1017/S1751731112000675>

[22] Falcone, G., de Luca, A. I., Stillitano, T., Strano, A., Romeo, G., & Gulisano, G. (2016). Assessment of environmental and economic impacts of vine-growing combining life cycle assessment, life cycle costing and multicriterial analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/su8080793>

[23] Craheix, D., Angevin, F., Doré, T., & de Tourdonnet, S. (2016). Using a multicriteria assessment model to evaluate the sustainability of conservation agriculture at the cropping system level in France. *European Journal of Agronomy*, 76, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.002>

[24] Giuliano, S., Ryan, M. R., Véricel, G., Rametti, G., Perdrieux, F., Justes, E., & Alletto, L. (2016). Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: A multi-criteria assessment. *European Journal of Agronomy*, 76, 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.016>

[25] Salembier, C., Elverdin, J. H., & Meynard, J. M. (2016). Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>

[26] Aydin, C. I., Ozertan, G., & Ozkaynak, B. (2013). Assessing the GMO debate in Turkey: The case of cotton farming. *New Perspectives On Turkey*, 49, 5–29.

[27] Rozman, C., Unuk, T., Pazek, K., Lesnik, M., Prisenk, J., Vogrin, A., & Tojnko, S. (2013). Multi Criteria Assessment of Zero Residue Apple Production. *Erwerbs-Obstbau*, 55(2), 51–62. <https://doi.org/10.1007/s10341-013-0186-y>

[28] Loyce, C., Meynard, J. M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M. H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., & Doussinault, G. (2012). Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Research*, 125, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.007>

[29] Dantsis, T., Douma, C., Giourga, C., Loumou, A., & Polychronaki, E. A. (2010). A methodological approach to assess and compare the sustainability level of agricultural plant production systems. *Ecological Indicators*, 10(2), 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.05.007>

- [30] Fernandes, L. A. de O., & Woodhouse, P. J. (2008). Family farm sustainability in southern Brazil: An application of agri-environmental indicators. *Ecological Economics*, *66*(2–3), 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.01.027>
- [31] Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Gérardeaux, E., Gaborel, C., Ballo, D., & Fadegnon, B. (2007). An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development*, *27*(2), 101–110. <https://doi.org/10.1051/agro:2006037>
- [32] Law, E. P., Wayman, S., Pelzer, C. J., Culman, S. W., Gómez, M. I., Ditommaso, A., & Ryan, M. R. (2022). Multi-Criteria Assessment of the Economic and Environmental Sustainability Characteristics of Intermediate Wheatgrass Grown as a Dual-Purpose Grain and Forage Crop. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(6). <https://doi.org/10.3390/su14063548>
- [33] Adeux, G., Guinet, M., Courson, E., Lecaulle, S., Munier-Jolain, N., & Cordeau, S. (2022). Multicriteria assessment of conservation agriculture systems. *Frontiers in Agronomy*, *4*. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.999960>
- [34] Heiba, Y., Ibrahim, M. G., Mohamed, A. E., Fujii, M., & Nasr, M. (2023). Developing smart sustainable irrigation matrix (SIM)-based model for selection of best irrigation techniques: A framework to achieve SDGs. *Journal of Cleaner Production*, *420*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138404>
- [35] Caffi, T., Helsen, H. H. M., Rossi, V., Holb, I. J., Strassemeyer, J., Buurma, J. S., Capowiez, Y., Simon, S., & Alaphilippe, A. (2017). Multicriteria evaluation of innovative IPM systems in pome fruit in Europe. *Crop Protection*, *97*, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.12.009>
- [36] Purushothaman, S., Patil, S., & Francis, I. (2012). Impact of policies favouring organic inputs on small farms in Karnataka, India: A multicriteria approach. *Environment, Development and Sustainability*, *14*(4), 507–527. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9340-1>
- [37] Sester, M., Craheix, D., Daudin, G., Sirdey, N., Scopel, E., & Angevin, F. (2015). Assessment of the sustainability of conservation agriculture cropping systems in Madagascar (Alaotra Lake) using MASC-Mada. *Cahiers Agricultures*, *24*(2), 123–133. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0741>
- [38] Cavan, N., Omon, B., Dubois, S., Toqué, C., van Inghelandt, B., Queyrel, W., Colbach, N., & Angevin, F. (2023). Model-based evaluation in terms of weed management and overall sustainability of cropping systems designed with three different approaches. *Agricultural Systems*, *208*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103637>
- [39] Lairez, J., Jourdain, D., Lopez-Ridaura, S., Syfongxay, C., & Affholder, F. (2023). Multicriteria assessment of alternative cropping systems at farm level. A case with maize on family farms of South East Asia. *Agricultural Systems*, *212*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103777>
- [40] Cunha, M. C., Serpa, D., Marques, J., Keizer, J. J., & Abrantes, N. (2023). On sustainable improvements of agricultural practices in the Bairrada region (Portugal). *Environment*,

Development and Sustainability, 25(3), 2735–2757. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02155-3>

[41] Viguier, L., Cavan, N., Bockstaller, C., Cadoux, S., Corre-Hellou, G., Dubois, S., Duval, R., Keichinger, O., Toqué, C., Toupet de Cordoue, A. L., & Angevin, F. (2021). Combining diversification practices to enhance the sustainability of conventional cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126279>

[42] Catarino, R., Therond, O., Berthomier, J., Miara, M., Mérot, E., Misslin, R., Vanhove, P., Villerd, J., & Angevin, F. (2021). Fostering local crop-livestock integration via legume exchanges using an innovative integrated assessment and modelling approach based on the MAELIA platform. *Agricultural Systems*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103066>

[43] Pelzer, E., Bonifazi, M., Soulié, M., Guichard, L., Quinio, M., Ballot, R., & Jeuffroy, M. H. (2020). Participatory design of agronomic scenarios for the reintroduction of legumes into a French territory. *Agricultural Systems*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102893>

[44] Aouadi, N., Macary, F., & Alonso Ugaglia, A. (2020). Multi-criteria assessment of socioeconomic and environmental performance of wine-growing systems and agroecological transition scenarios. *Cahiers Agricultures*, 29. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020016>

[45] Pelzer, E., Bourlet, C., Carlsson, G., Lopez-Bellido, R. J., Jensen, E. S., & Jeuffroy, M. H. (2017). Design, assessment and feasibility of legume-based cropping systems in three European regions. *Crop and Pasture Science*, 68(10–11), 902–914. <https://doi.org/10.1071/CP17064>

[46] Moraine, M., Grimaldi, J., Murgue, C., Duru, M., & Therond, O. (2016). Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems*, 147, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.06.002>

[47] Petit, S., Munier-Jolain, N., Bretnolle, V., Bockstaller, C., Gaba, S., Cordeau, S., Lechenet, M., Mézière, D., & Colbach, N. (2015). Ecological Intensification Through Pesticide Reduction: Weed Control, Weed Biodiversity and Sustainability in Arable Farming. *Environmental Management*, 56(5), 1078–1090. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0554-5>

[48] Vasileiadis, V. P., Moonen, A. C., Sattin, M., Otto, S., Pons, X., Kudsk, P., Veres, A., Dorner, Z., van der Weide, R., Marraccini, E., Pelzer, E., Angevin, F., & Kiss, J. (2013). Sustainability of European maize-based cropping systems: Economic, environmental and social assessment of current and proposed innovative IPM-based systems. *European Journal of Agronomy*, 48, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.001>

[49] Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J. E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., & Doré, T. (2009). MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(3), 447–461. <https://doi.org/10.1051/agro/2009006>

[50] Mazzetto, F., & Bonera, R. (2003). MEACROS: a tool for multi-criteria evaluation of alternative cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 379–387. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00127-2)

- [51] Rose, C. W., & Adiku, S. (2001). Conceptual methodologies in agro-environmental systems. *Soil and Tillage Research*, 58(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00164-1)
- [52] Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., & Wery, J. (2008). SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural Systems*, 97(3), 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.003>
- [53] Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guérin, D., Guichard, L., Reau, R., & Messéan, A. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators*, 18, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019>
- [54] Mwambo, F. M., Fürst, C., Nyarko, B. K., Borgemeister, C., & Martius, C. (2020). Maize production and environmental costs: Resource evaluation and strategic land use planning for food security in northern Ghana by means of coupled energy and data envelopment analysis. *Land Use Policy*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104490>
- [55] Prusty, A. K., Natesan, R., Panwar, A. S., Jat, M. L., Tetarwal, J. P., López-Ridaura, S., Toorop, R. A., van den Akker, J., Kaur, J., Ghasal, P. C., Groot, J. C. J., Barba-Escoto, L., Kashyap, P., Ansari, M. A., & Shamim, M. (2022). Redesigning of Farming Systems Using a Multi-Criterion Assessment Tool for Sustainable Intensification and Nutritional Security in Northwestern India. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14073892>
- [56] Reckling, M., Bergkvist, G., Watson, C. A., Stoddard, F. L., Zander, P. M., Walker, R. L., Pristeri, A., Toncea, I., & Bachinger, J. (2016). Trade-offs between economic and environmental impacts of introducing legumes into cropping systems. *Frontiers in Plant Science*, 7(MAY2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00669>
- [57] Peigne, J., Lefevre, V., Craheix, D., Angevin, F., & Capitaine, M. (2015). Participatory assessment of innovative cropping systems combining conservation agriculture and organic farming. *Cahiers Agricultures*, 24(2), 134–141. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0737>
- [58] Iocola, I., Angevin, F., Bockstaller, C., Catarino, R., Curran, M., Messéan, A., Schader, C., Stilmant, D., Stappen, F. van, Vanhove, P., Ahnemann, H., Berthomier, J., Colombo, L., Guccione, G. D., Mérot, E., Palumbo, M., Virzì, N., & Canali, S. (2020). An actor-oriented multi-criteria assessment framework to support a transition towards sustainable agricultural systems based on crop diversification. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135434>
- [59] Colomb, B., & Glandières, A. (2019). Sustainability assessment of organic arable cropping systems of the French Midi-Pyrenees region. *Cahiers Agricultures*, 23(2). <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0693>
- [60] Notz, I., Topp, C. F. E., Schuler, J., Alves, S., Gallardo, L. A., Dauber, J., Haase, T., Hargreaves, P. R., Hennessy, M., Iantcheva, A., Jeanneret, P., Kay, S., Recknagel, J., Rittler, L., Vasiljević, M., Watson, C. A., & Reckling, M. (2023). Transition to legume-supported farming in Europe through redesigning cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00861-w>