



Avances y aplicaciones de la programación lineal y no lineal difusa en la optimización de la agricultura moderna

Advances and applications of fuzzy Linear and nonlinear programming in modern agriculture optimization

Maximiliano Asis-Lopez^{1,*}; Javier Hilasaca-Condori²; Patricia Huamán-Romero¹

¹ Departamento de Matemática, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Av. Universitaria s/n, Huaraz, Perú.

² Departamento de Matemática y Estadística, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores s/n, Tacna, Perú.

ORCID de los autores:

M. Asis-Lopez: <https://orcid.org/0000-0003-1724-053X>

J. Hilasaca-Condori: <https://orcid.org/0000-0002-8826-6051>

P. Huamán-Romero: <https://orcid.org/0000-0002-0733-2812>

RESUMEN

El crecimiento poblacional ejerce una presión creciente sobre los sistemas agrícolas, demandando una gestión eficiente y sostenible de los recursos. La programación lineal difusa (PLD) ha emergido como una herramienta clave para abordar la incertidumbre en la asignación de recursos, optimizar patrones de cultivo y promover la sostenibilidad agrícola. El propósito de este artículo es revisar sistemáticamente los avances y aplicaciones de la programación lineal y no lineal difusa en la agricultura moderna, abarcando desde la gestión del agua y fertilizantes hasta la planificación de cultivos y la mitigación de impactos ambientales. Se identificaron 842 documentos mediante una búsqueda sistemática en bases de datos científicas, aplicando criterios de inclusión y exclusión para seleccionar estudios relevantes. Los hallazgos evidencian el potencial de la PLD para integrar múltiples objetivos y manejar incertidumbres inherentes al contexto agrícola, proporcionando soluciones prácticas y sostenibles. Sin embargo, persisten desafíos que limitan su adopción a gran escala.

Palabras clave: programación lineal difusa; optimización agrícola; gestión de recursos; lógica difusa; agricultura moderna.

ABSTRACT

Population growth exerts increasing pressure on agricultural systems, demanding efficient and sustainable resource management. Fuzzy Linear Programming (FLP) has emerged as a key tool for addressing uncertainty in resource allocation, optimizing cropping patterns, and promoting agricultural sustainability. The purpose of this article is to systematically review the advances and applications of fuzzy linear and nonlinear programming in modern agriculture, ranging from water and fertilizer management to crop planning and environmental impact mitigation. We identified 842 documents through a systematic search of scientific databases, applying inclusion and exclusion criteria to select relevant studies. The findings demonstrate the potential of FLP to integrate multiple objectives and handle uncertainties inherent in the agricultural context, providing practical and sustainable solutions. However, challenges persist that limit its large-scale adoption.

Keywords: Fuzzy linear programming; agricultural optimization; resource management; fuzzy logic; modern agriculture.

1. Introducción

El crecimiento acelerado de la población mundial plantea desafíos sin precedentes para la sostenibilidad agrícola, especialmente en términos de producción de cultivos y gestión eficiente de recursos limitados. Según proyecciones de Naciones Unidas (2025), la población global alcanzará los 9.700 millones en 2050 y superará los 10.400 millones hacia 2080, frente a los 8.000 millones actuales. Este crecimiento intensifica la presión sobre los sistemas agrícolas, exigiendo soluciones innovadoras para abordar la escasez de tierra cultivable, la disponibilidad de agua, el uso eficiente de fertilizantes y las prácticas sostenibles. El rendimiento de los cultivos no solo afecta la seguridad alimentaria, sino que también influye en los ingresos de los agricultores y los precios de mercado, subrayando la importancia de estrategias de planificación agrícola más avanzadas y resilientes.

En este contexto, la programación lineal difusa (PLD) ha emergido como una herramienta prometedora para la optimización de problemas agrícolas bajo incertidumbre. A diferencia de los métodos de programación lineal tradicionales, la PLD permite modelar situaciones en las que los datos son imprecisos, lo que es crucial en escenarios agrícolas donde factores como el clima, la disponibilidad de agua y las horas de trabajo presentan alta variabilidad (Lu et al., 2011; Li et al., 2022). Asimismo, la lógica difusa ha mostrado ser una herramienta poderosa para enfrentar incertidumbres agrícolas derivadas de fenómenos naturales, errores de estimación y objetivos imprecisos (Chang et al., 2001; Ning & Chang, 2004; Zhang & Huang, 2010). Estas técnicas han permitido desarrollar estrategias de ahorro de agua, revestimiento de canales y uso eficiente de aguas subterráneas, incrementando la sostenibilidad agrícola (Khare & Jat., 2006; Zhang et al., 2018).

No obstante, persisten desafíos relacionados con la integración de estos métodos en sistemas agrícolas más complejos, especialmente considerando las interrelaciones entre agua, tierra y energía (Fernández et al., 2020; Guan et al., 2020). Además, la contradicción entre el crecimiento de la demanda de alimentos y energía y la reducción de la oferta de agua agrícola es cada vez más feroz en los últimos años (Egea et al., 2017). En esta misma línea, De & Singh (2021) realizaron una revisión de la literatura sobre las aplicaciones de la lógica difusa en la gestión de la cadena de suministro agrícola, destacando su

capacidad para abordar la incertidumbre inherente a este sector, especialmente en factores como el contenido del suelo, la lluvia y la predicción del rendimiento.

El objetivo de este artículo es realizar una revisión sistemática sobre los avances y aplicaciones de la programación lineal y no lineal difusa en la agricultura moderna. Se analizan casos de éxito en la optimización de recursos y la planificación de cultivos, además de identificar limitaciones y oportunidades para su integración con tecnologías emergentes como el aprendizaje automático. Asimismo, se busca explorar y difundir los métodos de programación lineal difusa aplicados al sector agrícola. Con ello, se pretende contribuir al desarrollo de una agricultura más eficiente, resiliente y sostenible, capaz de afrontar los desafíos actuales y futuros.

2. Metodología

La presente revisión de la literatura científica se diseñó para analizar el estado actual del uso de la Programación Lineal y no Lineal Difusa en el ámbito agrícola. La metodología se fundamentó en una búsqueda estructurada y sistemática en diversas bases de datos académicas de alto impacto, seguida de un riguroso proceso de selección y análisis de los estudios relevantes.

2.1. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Se realizaron búsquedas exhaustivas en las siguientes bases de datos, utilizando ecuaciones de búsqueda diseñadas específicamente para optimizar la recuperación de literatura relevante. Como resultado de esta combinación de búsquedas iniciales, se obtuvo un total de 842 documentos:

Web of Science: Se identificaron 113 documentos mediante la ecuación de búsqueda: TS=("Fuzzy Linear Programming") AND TS=(Agriculture).

Scopus: Se recuperaron 13 documentos utilizando la siguiente ecuación, con restricciones de idioma inglés y tipos de documento "Artículo" (ar) o "Artículo de Conferencia" (cp): (TITLE-ABS-KEY ("Fuzzy Linear Programming") AND TITLE-ABS-KEY (agriculture)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp")).

IEEE Xplore: La búsqueda con la ecuación ("All Metadata": "Fuzzy Linear Programming") AND ("All Metadata": agriculture) arrojó 28 resultados.

ScienceDirect: Se localizaron 193 documentos empleando la ecuación "fuzzy linear programming" AND Agriculture.

SCIELO: Se realizaron múltiples búsquedas exploratorias para abarcar diversas perspectivas y contextos, obteniendo los siguientes resultados: fuzzy and agricultura (241 documentos), fuzzy decision making (37 documentos), fuzzy agricultural production model (4 documentos), optimization under uncertainty (39 documentos), fuzzy optimization in agricultura (2 documentos), uncertainty management in agricultura (9 documentos).

Google Scholar: Se recuperaron 163 documentos utilizando la ecuación lógica fuzzy and agricultura.

2.2. Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se llevó a cabo en las siguientes etapas para garantizar la inclusión de estudios relevantes y de calidad:

Identificación inicial: Los 842 documentos recuperados de las diferentes bases de datos se integraron en una única base de datos bibliográfica, donde se eliminaron los registros duplicados.

Filtrado preliminar: Se realizó una revisión exhaustiva de los títulos y resúmenes de los documentos identificados. En esta etapa, se aplicaron los criterios de inclusión para descartar aquellos estudios que claramente no se ajustaban al tema central de la revisión.

Evaluación exhaustiva: Los documentos preseleccionados en la etapa anterior fueron analizados en su totalidad para verificar en detalle su pertinencia temática, rigor metodológico y calidad del contenido.

2.3. Criterios de inclusión y exclusión

Para asegurar la pertinencia y calidad de los estudios incluidos en esta revisión, se definieron los siguientes criterios:

Idioma: Se incluyeron únicamente documentos publicados en inglés, español y portugués.

Tipo de Documento: Se consideraron artículos de investigación originales, ponencias de congresos con revisión por pares y artículos de revisión publicados en revistas indexadas.

Relevancia Temática: Se seleccionaron estudios que abordaran directamente la aplicación de la programación lineal difusa en el contexto de la agricultura, incluyendo la optimización de recursos agrícolas, el manejo de la incertidumbre en la toma de decisiones agrícolas y el desarrollo de modelos de producción agrícola basados en lógica difusa. Duplicados: Se excluyeron aquellos artículos que fueron identificados como duplicados en las diferentes bases de datos consultadas.

2.4. Análisis y síntesis de datos

Los documentos que cumplieron con los criterios de inclusión fueron objeto de un análisis detallado. Se procedió a clasificar los estudios según su enfoque metodológico específico, las aplicaciones agrícolas abordadas y los principales resultados y conclusiones obtenidos.

Se empleó el software de gestión bibliográfica Mendeley para la organización sistemática de las referencias y la facilitación del análisis cualitativo de la información extraída. Adicionalmente, se llevaron a cabo análisis cuantitativos descriptivos para identificar tendencias en la investigación, las áreas de aplicación más frecuentes y los posibles vacíos de conocimiento en el campo de estudio. Tras la aplicación de los criterios de selección y el proceso de filtrado, se procedió a la lectura completa y el análisis de 87 documentos que constituyeron la base para la síntesis de esta revisión. Esta metodología rigurosa permitió obtener una visión integral y actualizada sobre las aplicaciones de la programación lineal difusa en la agricultura, proporcionando una base sólida para identificar futuras líneas de investigación y comprender el impacto de esta herramienta en el sector agrícola.

3. Optimización del uso del agua

La gestión eficiente del agua en el sector agrícola es fundamental para asegurar la sostenibilidad económica y ambiental, ya que la agricultura de regadío consume aproximadamente el 70% del agua dulce utilizada en el mundo (Kang et al., 2017). Además de maximizar el rendimiento de los cultivos, una adecuada administración del recurso hídrico está estrechamente vinculada al crecimiento vegetal y la producción alimentaria.

Asimismo, influye directamente en los procesos de transformación física del agua de riego, con impactos significativos en la salud ambiental de las áreas irrigadas (Jacobs et al., 2016).

Diversos estudios han evidenciado que las técnicas basadas en optimización difusa, lógica difusa y modelos computacionales avanzados constituyen soluciones efectivas para abordar problemas en escenarios caracterizados por incertidumbre. Las técnicas avanzadas de programación matemática difusa (PMD) y programación matemática de intervalos (PMI) han abordado problemas relacionados con la calidad y distribución del agua (Zhang et al., 2009; Zhang & Huang, 2011; Lu et al., 2012). Sin embargo, el diseño de patrones óptimos de cultivo requiere abordar restricciones como la disponibilidad de agua, las características del suelo, las condiciones socioeconómicas locales y el uso adecuado de fertilizantes. En particular, la gestión eficiente de los recursos hídricos es crucial para maximizar la rentabilidad agrícola, dado que el agua es un recurso esencial y cada vez más escaso en muchas regiones debido al incremento de la demanda industrial y agrícola (Qadir et al., 2007; Perez et al., 2007; Lu et al., 2011).

Un enfoque destacado es la optimización del sistema de riego, donde el método PF-CODAS combinado con el enfoque Best Worst demostró ser efectivo en la selección de bombas para riego por goteo, reduciendo el consumo de agua y aumentando la eficiencia productiva (Cámara et al., 2024). Sin embargo, esta técnica depende significativamente del juicio experto, lo que la hace sensible a la variabilidad de los criterios empleados. Además, Kamber et al. (2024) desarrollaron una metodología integrada que combina el método difuso BWM (Best-Worst Method) y CODAS (COMprehensive Distance-based ASsessment) para priorizar alternativas de bombas de riego por goteo en aplicaciones agrícolas, con el objetivo de facilitar la selección de las bombas más adecuadas considerando aspectos de sostenibilidad; si bien esta metodología ofrece un marco robusto para la toma de decisiones, su aplicación puede verse influenciada por la subjetividad inherente a la determinación de los criterios de selección y sus correspondientes ponderaciones.

En regiones con disponibilidad hídrica limitada, la optimización multiobjetivo ha sido ampliamente aplicada para equilibrar objetivos económicos y de eficiencia hídrica. Por ejemplo, Lalehzari et al. (2016) emplearon el algoritmo genético NSGA-II para diseñar estrategias de asignación de agua en

la llanura de Baghmalek, Irán, logrando maximizar simultáneamente el beneficio neto y la eficiencia en el uso del agua. No obstante, el modelo mostró limitaciones al no considerar el riego deficitario en etapas críticas de ciertos cultivos, restringiendo su aplicabilidad en condiciones de sequía extrema. Complementariamente, estudios como los de Li et al. (2022) y Zhang & Guo (2018) exploraron la programación fraccional difusa y el enfoque multiobjetivo, evidenciando mejoras en la sostenibilidad hídrica y el ahorro de recursos en regiones áridas, aunque estos enfoques requieren una adecuada estructuración de datos y un alto poder computacional. Además, a un nivel más integrado, modelos como la programación estocástica multiobjetivo (SMONLP) y enfoques difusos con números intuicionistas han permitido simular escenarios con variabilidad climática y de disponibilidad hídrica, identificando estrategias sostenibles para el uso del agua (Li et al., 2017; 2019; 2024). Estas metodologías aportan una visión más completa al incorporar múltiples objetivos y fuentes de incertidumbre, aunque requieren información detallada y herramientas de análisis robustas.

Por otro lado, avances en la estimación de la humedad del suelo han sido logrados mediante redes neuronales optimizadas con métodos como Scaled Conjugate Gradient y BFGS Quasi-Newton, facilitando el riego basado en necesidades específicas de las plantas (Mohapatra & Lenka, 2016). Aunque estos modelos mejoran significativamente la precisión en la predicción, su implementación demanda un volumen considerable de datos de sensores y calibraciones frecuentes, lo que puede limitar su adopción en áreas con recursos tecnológicos escasos.

El uso de modelos avanzados como el de programación lineal multiobjetivo difusa (LMOFP) ha demostrado ser particularmente eficaz en regiones áridas. Ren et al. (2017) aplicaron este enfoque en Wuwei, Gansu, China, integrando objetivos económicos, ecológicos y administrativos. El modelo, basado en funciones de membresía triangulares y el método de desviación mínima, generó esquemas óptimos para diferentes niveles de incertidumbre, reduciendo áreas de riego en distritos con bajos rendimientos y promoviendo el ahorro de agua para usos industriales y ambientales.

Adicionalmente, herramientas como AquaCrop-MORPP han incrementado la eficiencia hídrica en un 24% en regiones semiáridas, optimizando tanto las cantidades como las fechas de riego (Wang et al., 2022). Por otro lado, enfoques como

la programación multiobjetivo no lineal por intervalos distribuidos (DINMP) han integrado datos satelitales para optimizar el riego en la cuenca del río Heihe, demostrando un alto potencial en el manejo sostenible de recursos hídricos (Tang et al., 2019).

La salinidad del suelo y su impacto en cultivos específicos también han sido abordados mediante modelos difusos. Neto et al. (2019) identificaron condiciones óptimas de salinidad y capacidad de campo para maximizar la productividad del tomate híbrido, proporcionando evidencia científica para la toma de decisiones ajustadas a variables locales.

En el ámbito de la planificación agrícola integral, diversos estudios han desarrollado enfoques innovadores para gestionar recursos hídricos bajo incertidumbre. Zhang et al. (2014) propusieron un enfoque de programación interactiva inexacta con intervalos difusos, integrando incertidumbres relacionadas con la calidad del agua y la producción agrícola, lo que permitió equilibrar beneficios económicos y restricciones ambientales en escenarios de múltiples objetivos. De manera complementaria, Laskookalayeh et al. (2022) implementaron un modelo de Programación Matemática Positiva Robusta (RPMP), logrando una redistribución equitativa del agua en la red de riego de Tajan, Irán, mientras que Raju & Duckstein (2003) aplicaron un modelo de programación lineal difusa multiobjetivo (MOFLP) para maximizar beneficios netos, producción agrícola y empleo laboral, demostrando su eficacia en la generación de soluciones de compromiso. Cheng et al. (2022), por su parte, desarrollaron un método de Programación Bicriterio Difusa de Tipo 2 (T2FBL) que, mediante un algoritmo de clasificación difusa mejorado, gestiona parámetros inciertos como la precipitación y la demanda hídrica, permitiendo la asignación óptima de recursos entre sectores agrícolas, industriales y terciarios, aunque enfrenta desafíos computacionales y de modelización exhaustiva. Estos enfoques resaltan la importancia de integrar modelos matemáticos avanzados para abordar la planificación sostenible y eficiente de recursos en contextos agrícolas.

Modelos híbridos han demostrado ser herramientas eficaces para abordar la asignación sostenible de recursos hídricos en escenarios complejos, integrando técnicas avanzadas para manejar incertidumbres ecológicas y climáticas. Por ejemplo, Rong et al. (2019) propusieron un modelo de programación mixta entera restringida

por credibilidad difusa basado en simulación inexacta (ISFCCMIP), mientras que Li et al. (2017) desarrollaron un enfoque de programación multiobjetivo difusa intuicionista (IFMONLP), ambos diseñados para equilibrar beneficios agrícolas y sostenibilidad ambiental. Yang et al. (2016) introdujeron el método de un solo paso (SSM), una programación lineal con parámetros de intervalo, aplicado en el distrito de riego Shijin, China, que optimizó la asignación hídrica maximizando los beneficios económicos y priorizando cultivos de mayor rendimiento como maíz y trigo. En esta línea, Li et al. (2018) propusieron un modelo de Programación Multiobjetivo de Intervalo Lineal (ILMP) que equilibró beneficios económicos, rendimientos agrícolas y ahorro hídrico mediante números de intervalo para representar incertidumbres en objetivos y restricciones vinculadas al uso de aguas superficiales y subterráneas. Además, Li et al. (2009) diseñaron un modelo híbrido de gestión hídrica difuso-estocástico (FSWM) basado en programación cuadrática multietapa, incorporando incertidumbres difusas y aleatorias mediante un árbol de escenarios, logrando estabilidad en los objetivos y facilitando la planificación hídrica agrícola.

Por último, Nematian (2023) investigó la asignación hídrica óptima en la presa Ajabshir Qaleh Chay mediante programación lineal mixta entera estocástica de dos etapas con parámetros de intervalo y variables difusas. Este modelo incrementó simultáneamente la rentabilidad y la certeza del sistema, proporcionando a las autoridades agrícolas herramientas robustas para mitigar la insostenibilidad hídrica y mejorar los ingresos de los agricultores.

En síntesis, los avances en lógica difusa y técnicas computacionales han desarrollado herramientas robustas para la gestión eficiente del agua en la agricultura. No obstante, persisten desafíos significativos, como la complejidad de su implementación práctica, la elevada demanda de datos y los altos costos computacionales, lo que resalta la necesidad de impulsar investigaciones futuras orientadas a optimizar la accesibilidad, reducir las barreras técnicas y mejorar la adaptabilidad de estas tecnologías a diversos contextos agrícolas.

4. Uso de fertilizantes y eficiencia energética

La lógica difusa ha demostrado su utilidad en la optimización del uso de fertilizantes y la eficiencia energética en la agricultura. Se han desarrollado modelos de programación lineal difusa para

planificar la fertilización en cultivos (Niquin-Alayo et al., 2018; Vergara & Neyra, 2021) y determinar las ubicaciones más adecuadas para plantas de conversión de residuos en energía (Ilbahar et al., 2021; Pan et al., 2023), considerando la imprecisión inherente a las restricciones de disponibilidad de recursos. Además, se han empleado marcos difusos tipo-2 para la valoración de múltiples criterios en la selección de emplazamientos de plantas de conversión de residuos en energía (Pan et al., 2023) y modelos integrales como el modelo Agua-Energía-Alimentos con Sistemas Fuzzy Multiobjetivo (AWEFSM) para gestionar el nexo agua-energía-alimentos (Li et al., 2019), así como juegos de matrices difusos de tipo 2 intuicionistas para abordar la implementación de plantas de biogás (Karmakar et al. 2021).

5. Sostenibilidad y nexo agua-energía-alimentos

La gestión sostenible de los recursos agrícolas requiere un enfoque que integre las dimensiones de agua, energía, alimentos y medio ambiente. Se han desarrollado modelos de programación multiobjetivo bajo incertidumbre para gestionar de manera sostenible estos recursos, combinando programación estocástica, números difusos y restricciones de credibilidad (Yue & Guo, 2021; Zuo et al., 2021). Asimismo, se han propuesto modelos basados en técnicas de programación lineal multiobjetivo difusa para optimizar el uso directo de energía en diversas operaciones del sector agrícola (Jana & Chattopadhyay, 2005).

6. Componente ambiental en la agricultura

La integración del componente ambiental es fundamental para lograr la sostenibilidad en la agricultura. Se han desarrollado enfoques basados en la programación lineal fraccional multiobjetivo con credibilidad difusa para abordar la planificación de áreas de cultivo, considerando la incertidumbre en parámetros clave y optimizando objetivos económicos y ambientales (Zhang et al., 2023). Además, se han propuesto modelos para la gestión de la contaminación de fuentes no puntuales (Liu et al., 2013) y la optimización sinérgica económico-ambiental del patrón de cultivos bajo el cambio climático (Chen et al., 2022a). Además, Rodríguez & Martínez-López (2019) investigan la gestión ambiental en la agricultura, enfocándose en la identificación y manejo de los síntomas del síndrome de sobreutilización del suelo. El estudio utiliza un modelo de lógica difusa basado en las propuestas de Gil-Aluja (1999) para evaluar indicadores

ambientales y ordenar las parcelas según su nivel de afectación, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad del suelo. Este enfoque permitió establecer un modelo priorizado para intervenir en las parcelas más críticas, contribuyendo a la sostenibilidad del agro-sistema.

7. Planificación de uso de tierras agrícolas y rotación de cultivos

La planificación efectiva del uso de las tierras agrícolas es esencial para lograr la sostenibilidad en la agricultura y proteger el medio ambiente. Se han aplicado técnicas de programación de metas difusas para modelar y resolver problemas de planificación del uso de la tierra (Biswas & Pal, 2005) y se han desarrollado modelos difusos de intervalo con restricciones de oportunidad para apoyar la planificación del uso de la tierra, considerando la incertidumbre y diversos factores como la disponibilidad de recursos y la erosión del suelo (Ou et al., 2017). También se han propuesto enfoques innovadores que integran el análisis del ciclo de vida territorial (LCA) con la optimización multi-objetivo (MOO) para generar escenarios óptimos de planificación del uso de la tierra (Ding et al., 2023) y métodos de programación semi-infinita difusa inexacta basados en simulación para la gestión del área cultivada agrícola (Gui et al., 2017).

La optimización de los sistemas de rotación de cultivos es crucial para maximizar el rendimiento agrícola y mantener la salud del suelo. Se ha utilizado la programación lineal fraccional (FLP) para optimizar los sistemas de rotación de cultivos (Srivastava & Singh, 2015; Mishra & Singh, 2020) y se han combinado sistemas difusos con métodos de optimización para equilibrar objetivos ecológicos y económicos (Neamatollahi et al., 2017). También se han aplicado la programación de metas neutrosóficas (NGP) y modelos basados en la programación de metas difusas intuicionista ponderada (WIFGP) para mejorar la asignación de tierras de cultivo (Angammal & Grace, 2024; Moges et al., 2023), así como la programación de metas difusas para abordar la imprecisión en la información agrícola (Mishra & Singh, 2016). Asimismo, se han desarrollado modelos de planificación del área de cultivo multi-objetivo basados en la credibilidad (Chen et al., 2022b) y modelos de programación matemática multicriterio difuso (FMCDM) para optimizar los planes de producción agrícola (Bournaris et al., 2009).

8. Planificación de la producción y la agroindustria

La lógica difusa ha sido aplicada en la selección de técnicas de producción agrícola sostenibles, como la agricultura orgánica (Rouyendegh & Savalan, 2022) y en la planificación de la producción de frutas en zonas semiáridas, considerando la incertidumbre inherente a este tipo de agricultura (Kousar et al., 2022). Se han implementado modelos de programación lineal difusa intuicionista triangular (TIFLP) para diseñar planes estratégicos de producción frutícola, capturando la imprecisión asociada a variables como la irrigación, la fertilización y las condiciones socioeconómicas locales (Kousar et al., 2022).

La lógica difusa se ha aplicado en el desarrollo de modelos adaptativos para evaluar la sostenibilidad de la cadena de suministro agroindustrial (Yani et al., 2022) y en modelos de planificación de la producción agrícola basados en la teoría de credibilidad para maximizar el beneficio esperado en entornos de incertidumbre (Yuan et al., 2011). También se han propuesto estrategias óptimas de planificación agrícola mediante enfoques de programación difusa (FPA) (Srivastava & Singh, 2015) y modelos de programación estocástica de dos etapas inexacto basados en variables aleatorias difusas (RFV-ITSCCP) para optimizar la asignación del área de cultivo (Li & Guo, 2015). Asimismo, se han desarrollado modelos de programación de restricciones de confianza difusas inexactas (IFCCP) para optimizar la gestión del nexo agua-alimentos bajo incertidumbre (Liu et al., 2024) y modelos de programación lineal para la planificación de cultivos que incorporan valores inciertos (estocásticos) en sus coeficientes (Itoh et al., 2003). La técnica de optimización difusa también

se ha utilizado para la planificación de la producción de cultivos en diferentes grupos de agricultores (Basumatary & Mitra, 2020) y para planificar cultivos bajo incertidumbre climática (Liu et al., 2013).

9. Agricultura inteligente

Los sistemas de agricultura inteligente basados en lógica difusa e IoT han demostrado su eficacia para optimizar el monitoreo y control de factores ambientales, como la humedad del aire, la temperatura del aire y la humedad del suelo, en el cultivo de ají (Abdullah et al., 2021). Estos sistemas utilizan reglas difusas y variables lingüísticas para decidir el tiempo de encendido y apagado de las bombas de riego, logrando reducir el consumo de agua y el tiempo de riego.

Por otro lado, la gestión inteligente del agua ayuda al agricultor para medir y ajustar volúmenes de riego de manera eficiente, esto demuestra la ventaja de construir las reglas con ecuaciones matemáticas y variables lingüísticas, dado que hay estudios donde el tiempo de riego con el controlador difuso propuesto varía de 3,5 a 14 s. El tiempo de riego manual es de entre 1 y 2 minutos. El tiempo empleado se ha reducido significativamente, aproximadamente un 88,3%. Con el sistema propuesto, el agricultor puede ahorrar más tiempo y energía (Abdullah, 2024).

10. Resumen de hallazgos en aplicaciones agrícolas

Para consolidar las aplicaciones más relevantes los hallazgos se resumen en la Tabla 1, donde se destaca la aplicación, enfoques utilizados, ventajas, limitaciones y estudios representativos.

Tabla 1

Avances recientes en teoría y aplicaciones de programación lineal y no lineal difusa

Referencia	Objetivo de la investigación	Tipo de programación lineal difusa
Cámara et al. (2024)	Seleccionar bombas para riego por goteo	Programación lineal difusa con lógica difusa extendida y métodos de toma de decisiones multicriterio
Zhang & Guo (2018)	Desarrollar un modelo de programación lineal fraccional difusa (PLFD) con imprecisión en ambos lados de las restricciones para la asignación óptima de agua de riego en condiciones de incertidumbre	Programación lineal fraccional difusa (PLFD)
Zhang et al. (2014)	Desarrollar un enfoque interactivo de programación lineal difusa con intervalos acotados para gestionar la calidad del agua en sistemas agrícolas, maximizando los beneficios del sistema y minimizando los riesgos.	Programación interactiva difusa con intervalos acotados.
Tang et al. (2019)	Optimizar la asignación de agua de riego limitada considerando la distribución espacial de los cultivos y las precipitaciones, bajo condiciones de incertidumbre y variabilidad espaciotemporal, para mejorar la productividad agrícola y apoyar el desarrollo sostenible.	Programación No Lineal Multiobjetivo por Intervalos Distribuidos (DINMP).

Yue & Guo (2021)	Desarrollar un modelo de optimización agrícola para la gestión sostenible, buscando maximizar el beneficio económico y la energía renovable, y minimizar las huellas hídricas y de carbono, todo ello gestionando la incertidumbre.	Programación mixta no lineal multiobjetivo con restricciones de credibilidad difusa.
Neamatollahi et al. (2017)	Diseñar un modelo de optimización del patrón de cultivos en la agricultura utilizando sistemas difusos	sistemas difusos con métodos de optimización para equilibrar objetivos ecológicos y económicos
Neto et al. (2019)	Evaluar el crecimiento y rendimiento del tomate híbrido bajo diferentes niveles de riego y salinidad utilizando modelado difuso	Modelos difusos
Zuo et al. (2021)	Desarrollar un enfoque de programación de intervalo difuso tipo 2 basado en escenarios para optimizar la estructura de plantación y la asignación de recursos agrícolas bajo incertidumbre, maximizando el beneficio neto agrícola	Programación de Intervalo Difuso Tipo 2 basado en Escenarios
Zhang et al. (2023)	Desarrollar un enfoque de programación lineal fraccional multiobjetivo basado en credibilidad difusa para vincular el nexo agua-alimento-medioambiente.	Programación fraccional lineal multiobjetivo basada en credibilidad difusa.
Ren et al. (2017)	Desarrollar un modelo de programación lineal difusa multiobjetivo para optimizar simultáneamente el uso de agua de riego y tierra bajo incertidumbre, considerando objetivos administrativos, económicos y ecológicos.	Programación lineal multiobjetivo difusa (PLMOD) con parámetros difusos representados mediante funciones triangulares.
Wang et al. (2022)	Desarrollar un marco de optimización para la programación de riego, equilibrando las cantidades y fechas con la eficiencia del uso del agua y el beneficio económico neto.	Programación robusta posibilista (RPP), integrada con programación multiobjetivo.
Laskookalaye et al.	Formular un modelo para la distribución óptima del agua de riego bajo condiciones de incertidumbre y analizar el impacto de esta redistribución en el beneficio bruto de los agricultores.	Optimización Robusta combinada con Programación Matemática Positiva (PMP).
Mohapatra & Lenka (2016)	Diseñar un modelo de predicción de humedad del suelo para riego	Algoritmos de redes neuronales con optimización
Rong et al. (2019)	Desarrollar un modelo de programación entera mixta difusa basado en simulación para optimizar la estructura agrícola y el tamaño poblacional en una cuenca, gestionando múltiples incertidumbres.	Programación mixta entera con credibilidad difusa integrada.
Yani et al. (2022)	Diseñar un modelo adaptativo de evaluación de sostenibilidad basado en múltiples criterios difusos y formular estrategias de mejora para la sostenibilidad de la cadena de suministro de caña de azúcar	Modelos basados en lógica difusa para análisis multicriterio, específicamente FIS (sistema de inferencia Mamdani) y ANFIS.
Rouyendegh & Savalan (2022)	Desarrollar un modelo híbrido de toma de decisiones multicriterio (MCDM) que combine los métodos el Proceso Analítico Jerárquico Difuso de Buckley (B-FAHP) y TOPSIS difuso para evaluar y clasificar alternativas de técnicas de producción agrícola bajo incertidumbre y criterios múltiples.	Métodos híbridos de MCDM basados en conjuntos difusos, específicamente B-FAHP y Técnica de Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal Difusa (F-TOPSIS)
Rodríguez & Martínez-López (2019)	Identificar y evaluar los síntomas del síndrome de sobreutilización del suelo en un conjunto de parcelas agrícolas, utilizando lógica difusa para apoyar la toma de decisiones y mejorar la sostenibilidad ambiental.	Modelo matemático de lógica difusa basado en las propuestas de Gil-Aluja (1999). Este método utiliza funciones de pertenencia difusa para evaluar indicadores ambientales y permite ordenar parcelas según su grado de afectación por el síndrome de sobreutilización del suelo.
Vergara & Neyra (2021)	Desarrollar un modelo difuso con restricciones y costos difusos para la planificación de fertilización agrícola y proponer un método de solución que permita ilustrar la aplicabilidad del modelo.	Modelo de dieta difusa: Basado en restricciones y función objetivo con parámetros difusos, representados por números difusos triangulares.
Raju & Duckstein (2003)	Formular un modelo de programación lineal difusa multiobjetivo (MOFLP) para maximizar los beneficios netos, la producción agrícola, y el empleo laboral mientras se consideran aspectos de sostenibilidad.	Programación Lineal Difusa Multiobjetivo (MOFLP)
Yuan et al. (2011)	Desarrollar un modelo de planificación de producción agrícola basado en teoría de credibilidad que maximice las ganancias esperadas bajo incertidumbre representada por variables difusas.	Programación lineal difusa basada en un modelo de valor esperado con restricciones de credibilidad.
Yang et al. (2016)	Desarrollar un método mejorado basado en el método de un solo paso (SSM) para resolver modelos de programación lineal con parámetros de intervalo, y aplicarlo a la asignación óptima del agua de riego para maximizar los beneficios económicos de los agricultores.	Programación lineal con parámetros de intervalo
Lalehzari et al. (2016)	Diseñar un modelo de optimización de la asignación de agua en zonas áridas y semiáridas	Optimización multiobjetivo con NSGA-II, combinando funciones matemáticas lineales.
Liu et al. (2024)	Optimizar la planificación agrícola teniendo en cuenta las restricciones del consumo de agua y el uso de fertilizantes/pesticidas bajo incertidumbre	Modelo de programación de restricciones de confianza difusas

Abdullah et al. (2021)	Desarrollar un sistema de agricultura inteligente utilizando lógica difusa e IoT para monitorear y controlar factores ambientales (humedad del aire, temperatura del aire y humedad del suelo) para el riego eficiente de los cultivos.	Modelo de lógica difusa para controlar el tiempo de riego de la bomba, utilizando variables lingüísticas y reglas difusas para tomar decisiones basadas en las entradas de los sensores.
Srivastava & Singh (2015)	Identificar y formular estrategias de planificación óptimas mediante la optimización del rendimiento y el retorno en la formulación mono y multiobjetivo con los recursos hídricos disponibles en un área de comando de canal	Optimización multiobjetivo utilizando programación difusa.
Li et al. (2018)	Desarrollar un modelo de programación multiobjetivo de intervalo lineal (ILMP) para la asignación de agua de riego, considerando objetivos conflictivos e incertidumbres.	Programación multiobjetivo de intervalo lineal (ILMP) con método de programación difusa.
Li et al. (2017)	Desarrollar un modelo de programación no lineal multiobjetivo difuso intuicionista (IFMONLP) para la asignación de agua de riego bajo la combinación de condiciones secas y húmedas para ayudar a los tomadores de decisiones a mitigar la escasez de agua.	Programación no lineal multiobjetivo difuso intuicionista (IFMONLP).
Li & Guo (2015)	Desarrollar un modelo de programación estocástica de dos etapas inexacto basado en variables aleatorias difusas (RFV-ITSCCP) para la optimización del área de cultivo.	Programación estocástica de dos etapas inexacta basada en variables aleatorias difusas (RFV-ITSCCP).
Li et al. (2009)	Desarrollar un modelo híbrido de gestión del agua difuso-estocástico (FSWM) para la sostenibilidad agrícola bajo incertidumbre, basado en el avance de un enfoque de programación cuadrática difuso-estocástico multietapa (MFSQP).	Programación cuadrática difuso-estocástica multietapa (MFSQP).
Itoh et al. (2003)	Proponer un modelo de planificación de cultivos con valores inciertos (estocásticos) que pueda servir de apoyo a la toma de decisiones en las explotaciones agrícolas.	Modelo de programación lineal con valores inciertos, considerando elementos con borrosidad y aleatoriedad
Angammal & Grace (2024)	Diseñar un modelo de optimización para mejorar asignación de tierras de cultivo.	Programación de metas neutrosóficas (NGP) con algoritmos bioinspirados (Optimización de lobos grises (GWO), Optimización de grupos sociales (SGO) y Optimización de enjambre de partículas (PSO)).
Moges et al. (2023)	Diseñar y resolver un problema de optimización fraccional lineal multiobjetivo difuso intuicionista (IFMOLFO) para asignación de tierras agrícolas.	Modelo de dos fases de programación de metas difusas intuicionista ponderada (WIFGP).
Basumatary, & Mitra (2020)	Aplicar la técnica de formulación de optimización difusa para la planificación de la producción de cultivos para diferentes grupos de tamaño de agricultores.	Problema de programación lineal difusa multiobjetivo (MOFLPP).
Mishra & Singh (2016)	Mostrar la idoneidad de la programación de metas difusas en la asignación óptima de tierras para varios cultivos en el sistema de producción agrícola, considerando la imprecisión natural de la información disponible en los sistemas agrícolas.	Programación de metas difusas.
Chen et al. (2022)	Presentar un modelo de planificación del área de cultivo multi-objetivo basado en la credibilidad para la gestión agrícola y ecológica bajo incertidumbre.	Programación de credibilidad-restrinja difusa (FCCP)
Nematian (2023)	Investigar la asignación óptima de agua en la presa Ajabshir Qaleh Chay en el sector agrícola utilizando un enfoque de programación lineal mixta entera estocástica de dos etapas con parámetros de intervalo.	Programación lineal mixta entera estocástica de dos etapas con variables difusas.
Bourmaris et al. (2009)	Desarrollar un modelo de programación matemática multicriterio difuso para la planificación de regadíos agrícolas, y comparar sus resultados con modelos de programación matemática multicriterio y lineal simples.	Programación matemática multicriterio difusa (FMCDM).
Kousar et al.	Formular un modelo de programación lineal difuso intuicionista triangular para la planificación sostenible de la producción de frutas.	Programación lineal difusa intuicionista triangular.
Ilbahar et al. (2021)	Determinar las ubicaciones más adecuadas para plantas de conversión de residuos en energía.	Programación lineal difusa.
Ou et al. (2017)	Desarrollar un método de modelado difuso de intervalo con restricciones de oportunidad para apoyar la planificación del uso de la tierra.	Modelo difuso de intervalo con restricciones de oportunidad.
Pan et al. (2023)	Proponer un nuevo marco de toma de decisiones difuso de tipo 2 de intervalo para la selección de ubicación de plantas de conversión de residuos en energía.	Método ORESTE difuso de tipo 2 de intervalo.
Kamber et al. (2024)	Priorizar las alternativas de bombas de riego por goteo en aplicaciones agrícolas.	Metodología integrada difusa BWM y CODAS.
Lu et al. (2011)	Desarrollar un método de programación lineal difusa de intervalo aproximado inexacto para generar estrategias conjuntas de asignación de agua. para sistemas de riego agrícola	Método de programación lineal difusa de intervalo aproximado inexacto.

De & Singh (2021)	Revisar las aplicaciones de la lógica difusa para abordar la incertidumbre en la cadena de suministro agrícola.	Revisión de la literatura.
Cheng, et al. (2022)	Proponer un método de programación bicriterio difuso de tipo 2 (T2FBL) para planificar el sistema de recursos hídricos agrícolas	Programación bicriterio difusa de tipo 2 (T2FBL).
Ding et al. (2023)	Generar automáticamente escenarios óptimos de planificación vinculando el nuevo Análisis del Ciclo de Vida Territorial (LCA) con la optimización multi-objetivo (MOO).	optimización multi-objetivo (MOO)
Karmaka et al. (2021)	Aplicar juegos de matrices difusos de tipo 2 intuicionistas para el problema de implementación de plantas de biogás.	Juegos de matrices difusos de tipo 2 intuicionistas.
Jana & Chattopadhyay (2005)	Ofrecer un modelo que intente optimizar el uso directo de energía para diferentes operaciones en el sector agrícola.	Técnicas de programación lineal multiobjetivo difusa.
Biswas & Pal (2005)	Utilizar la técnica de programación de metas difusas para modelar y resolver problemas de planificación del uso de la tierra en sistemas agrícolas.	Técnica de programación de metas difusas.
Liu et al. (2013)	Desarrollar un modelo de mitigación de la contaminación de fuente no puntual (NPS) para la gestión de sistemas agrícolas bajo incertidumbre, a través de programas de retiro de tierras y comercio de descarga de nutrientes.	Modelo Interval Fuzzy Two-Stage Stochastic Non-Point Source Pollution Mitigation (IFTNS) que incorpora programación probabilística difusa (FPP) y programación lineal de intervalo
Chen et al. (2022)	Construir un modelo de programación multi-objetivo para optimizar sinérgicamente los cultivos bajo el cambio climático, buscando incrementar el beneficio económico y reducir la emisión de contaminantes.	Modelo de programación multi-objetivo.
Gui et al. (2017)	Desarrollar un método de programación semi-infinita difusa inexacta basado en simulación para la gestión del área cultivada agrícola en la cuenca del río Shiyang.	Programación semi-infinita difusa inexacta.

11. Desafíos actuales y futuros

La Figura 1(a) ilustra un mapa de co-ocurrencia de palabras clave, revelando la estructura temática de la investigación en agricultura y optimización difusa. El tamaño de los nodos denota su frecuencia y la proximidad indica clústeres temáticos.

El clúster central de "Optimización en Agricultura y Fertilizantes", liderado por "optimization" (amarillo), "fertilizers" (azul) y "agriculture" (rojo). Muestra cómo la optimización se aplica a la producción agrícola y el uso de fertilizantes, evidenciado por términos como "cultivation", "nitrogen fertilizers", "crop production", "quality control" y "agricultural robots". La presencia de "fuzzy mathematics" y "fuzzy logic" destaca el uso de la lógica difusa para la complejidad. Este clúster central conecta fuertemente con casi todos los demás grupos temáticos.

Otro clúster es "Recursos Hídricos y Sostenibilidad", que agrupa términos como "water supply", "water management", "groundwater", "water pollution", "sustainable development", "economic and social effects", "carbon footprint" y "water resources". Este se centra en la gestión hídrica agrícola con énfasis en la sostenibilidad ambiental y socioeconómica. La inclusión de "uncertainty analysis", "multiobjective optimization" y "decision making" sugiere la complejidad en la toma de decisiones para equilibrar

objetivos como el rendimiento y la conservación del agua. Este clúster se conecta fuertemente con los nodos centrales de "optimization" y "agriculture", subrayando su interdependencia.

El clúster "Lógica Difusa y Aprendizaje Automático" reúne técnicas avanzadas de IA y computación, como "fuzzy systems", "fuzzy inference", "forecasting", "adaptive neurofuzzy inference", "reinforcement learning", "algorithms", "fuzzy sets" y "fuzzy control". Este grupo destaca la aplicación de métodos computacionales sofisticados para la optimización y toma de decisiones agrícolas. Sus fuertes conexiones con los clústeres de "optimization" y "fuzzy logic" resaltan la relevancia de estas herramientas en la búsqueda de soluciones óptimas, y su vínculo con "precision agriculture" muestra cómo impulsan la modernización agrícola. Finalmente, el clúster "Cultivos y Aplicación de Fertilizantes" se enfoca en aspectos prácticos de la producción agrícola. Incluye términos como "crops", "crop yield", "fertilizer application", "irrigation", "maize", "wheat", "nitrogen" y "soils". Este grupo se conecta claramente con los clústeres centrales de "optimization" y "fertilizers", así como con "water resources", enfatizando la interconexión de estos factores para una producción agrícola eficiente y sostenible.

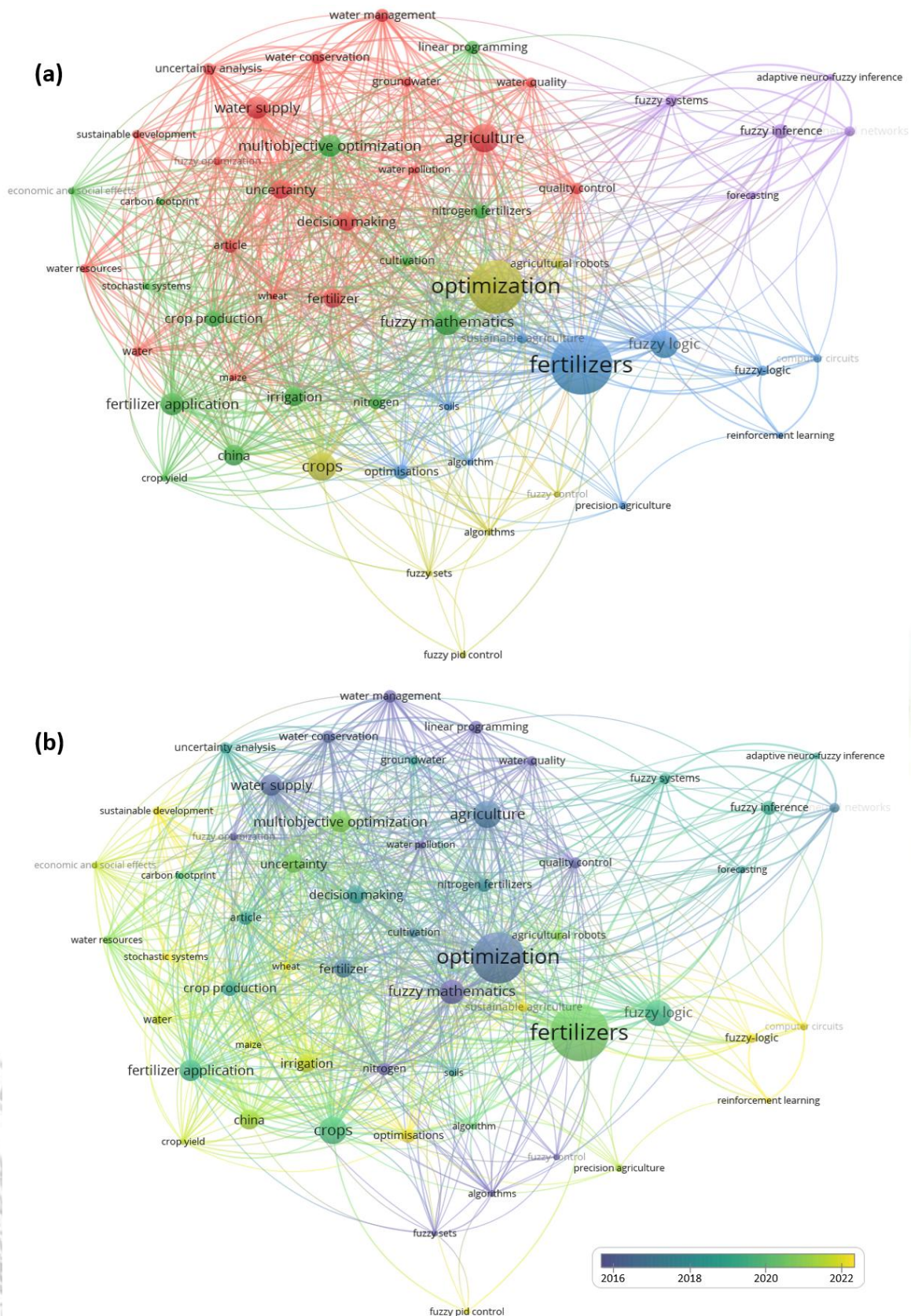


Figura 1. Análisis de coocurrencia de palabras clave. (a) Visualización de redes y clústeres; (b) Visualización de superposición en el tiempo. La data se obtuvo de Scopus y utilizando VosViewer (<https://www.vosviewer.com/>).

En síntesis, el mapa de co-ocurrencia revela un campo de investigación altamente multidisciplinario. La optimización es el concepto central que integra la agricultura con la gestión de fertilizantes, el uso eficiente del agua, la inteligencia artificial y la sostenibilidad. La recurrencia de "uncertainty analysis" y "fuzzy systems" subraya la importancia de abordar la incertidumbre agrícola con técnicas avanzadas. Además, términos como "fertilizer application", "irrigation" y "precision agriculture" destacan un fuerte enfoque en aplicaciones prácticas y la mejora de la productividad.

La Figura 1(b) presenta un mapa de co-ocurrencia de palabras clave con un gradiente de color que va del azul oscuro (2016) al amarillo brillante (2022). Este mapa visualiza la evolución temporal y las interconexiones temáticas en la investigación sobre agricultura, optimización y fertilizantes. El tamaño de cada nodo indica la frecuencia o relevancia de la palabra clave, mientras que su proximidad y los enlaces denotan co-ocurrencia. Además, los colores de los nodos y los enlaces muestran cuándo estos temas han ganado prominencia en la literatura.

En el centro del mapa, los términos "optimization" y "fertilizers" son los nodos más grandes y están conectados por una serie de enlaces que exhiben una evolución continua. Estos enlaces abarcan desde los tonos azules de los primeros años (2016-2017) hasta los verdes y amarillos más recientes (2020-2022). Esto sugiere que la optimización, especialmente en el contexto de la agricultura y el uso de fertilizantes, ha sido un tema central y consistentemente activo durante todo el período analizado. Conceptos como "fuzzy logic" y "fuzzy mathematics", aunque presentes en periodos anteriores (tonos azules y verdes), muestran conexiones persistentes, lo que indica la continua aplicación de estas técnicas en la optimización agrícola.

El clúster relacionado con la gestión del agua y la sostenibilidad incluye términos como "water management", "water supply", "water conservation", "uncertainty analysis", "multiobjective optimization" y "sustainable development", y exhibe una mezcla de colores. Si bien algunos nodos como "water supply" y "uncertainty" muestran una presencia más temprana (azules y verdes), la persistencia de enlaces con tonos más amarillos sugiere que la preocupación por la optimización de los recursos hídricos bajo incertidumbre y con un enfoque de sostenibilidad ha mantenido su relevancia. Es

posible que este tema haya evolucionado con nuevas perspectivas en los años más recientes. La interacción entre "economic and social effects" y "carbon footprint" con otros nodos de este clúster también apunta a una creciente atención a las implicaciones ambientales y socioeconómicas de la agricultura.

Finalmente, el clúster de técnicas de inteligencia artificial y computación, que abarca "fuzzy systems", "fuzzy inference", "adaptive neurofuzzy inference", "forecasting", "reinforcement learning", "algorithms" y "fuzzy sets", muestra una fuerte tendencia hacia colores más recientes (verdes y amarillos). Esto es particularmente notable en los enlaces que conectan "fuzzy logic" y "optimization" con "precision agriculture" y "reinforcement learning", lo que indica una adopción y desarrollo crecientes de métodos avanzados de inteligencia artificial en la agricultura en los últimos años. La evolución de "optimisations" hacia el amarillo también refuerza la idea de que los algoritmos y las técnicas de optimización están siendo explorados y aplicados de manera más intensiva en los últimos años.

El clúster centrado en cultivos específicos y prácticas agrícolas como "crops", "crop yield", "fertilizer application", "irrigation", "maize", "wheat" y "nitrogen" muestra una mezcla de temporalidades. Mientras que la "aplicación de fertilizantes" ha sido un tema constante (colores que van desde el azul al amarillo), la conexión entre "crops" y "optimizations" (nodos amarillos) también indica un enfoque reciente en la mejora del rendimiento de los cultivos a través de métodos de optimización.

A pesar de los avances significativos en optimización con programación difusa, persisten vacíos de conocimiento. Un desafío fundamental es la integración de modelos complejos que capturen la intrincada dinámica de los sistemas agrícolas, incluyendo factores biofísicos, socioeconómicos y ambientales, sin simplificar interdependencias.

Futuras investigaciones deberían enfocarse en modelos híbridos que combinen la optimización tradicional con el dinamismo del aprendizaje automático. Esta integración permitirá una gestión más adaptativa y en tiempo real, capaz de aprender de los datos para ajustar estrategias. Es imperativo que estas investigaciones evalúen el impacto a largo plazo en la sostenibilidad y la seguridad alimentaria, trascendiendo el rendimiento a corto plazo.

12. Conclusiones

La programación lineal difusa ha mostrado ser una herramienta poderosa para abordar los desafíos de la agricultura moderna. Sus aplicaciones abarcan desde la optimización del uso del agua y fertilizantes hasta la mitigación de impactos ambientales y la planificación estratégica. Sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con la representación de incertidumbres dinámicas y la escalabilidad de los modelos. Futuras investigaciones podrían centrarse en el desarrollo de modelos híbridos que combinen PLD con simulaciones dinámicas para representar interacciones más realistas entre recursos como agua y suelo. Además, la implementación de PLD en sistemas de agricultura vertical y cultivos hidropónicos emergentes podría ofrecer nuevas oportunidades para optimizar el uso de recursos en entornos controlados. Ejemplos prácticos incluyen la integración de PLD con sistemas IoT para monitorear en tiempo real variables críticas como humedad y nutrientes, facilitando una toma de decisiones más eficiente y sostenible.

Contribución de los autores

M. Asís-López: Conceptualización, investigación, metodología, supervisión, escritura-borrador original, revisión y edición, análisis formal, software y Visualización. **J. Hilasaca-Condori:** investigación, metodología, escritura borrador original, revisión y edición. **P. Huamán-Romero:** Escritura-borrador original, Análisis formal, revisión y edición.

Referencias bibliográficas

Angammal, S., & Grace, G. (2024). Neutrosophic goal programming technique with bio inspired algorithms for crop land allocation problem. *Scientific Reports*, 14, 21565. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69487-0>

Biswas, A., & Pal, B. B. (2005). Application of fuzzy goal programming technique to land use planning in agricultural system. *Omega*, 33(5), 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.07.003>

Bourmaris, T., Papathanasiou, J., Moulgianni, C., & Manos, B. (2009). A fuzzy multicriteria mathematical programming model for planning agricultural regions. *New Medit*, 8(4), 22-27.

Chang, N. B., Chen, H. W., & Ning, S. K. (2001). Identification of river water quality using the fuzzy synthetic evaluation approach. *Journal of Environmental Management*, 63(3), 293-305. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0483>

Chen, J., Zhang, C., & Guo, P. (2022a). A credibility-based interval multi-objective crop area planning model for agricultural and ecological management. *Agricultural Water Management*, 269, 107687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107687>

Chen, Y., Zhou, Y., Fang, S., Li, M., Wang, Y., & Cao, K. (2022b). Crop pattern optimization for the coordination between economy and environment considering hydrological uncertainty. *Science of the Total Environment*, 809, 151152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151152>

Cheng, Y., Jin, L., Pan, Y., Bai, R., Wei, Y., & Huang, G. (2022). An improved fuzzy sorting algorithm coupling bi-level programming for synergetic optimization of agricultural water resources: A case study of Fujian Province, China. *Journal of environmental management*, 312, 114946. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114946>

De, A., & Singh, S. P. (2021). Analysis of fuzzy applications in the agri-supply chain: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124577. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124577>

Ding, T., Steubing, B., & Achten, W. M. (2023). Coupling optimization with territorial LCA to support agricultural land-use planning. *Journal of environmental management*, 328, 116946. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116946>

Egea, G., Fernández, J. E., & Alcon, F. (2017). Financial assessment of adopting irrigation technology for plant-based regulated deficit irrigation scheduling in super high-density olive orchards. *Agricultural Water Management*, 87, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.008>

Fernández, J. E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., & Cuevas, M. V. (2020). Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural water management*, 237, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>

Gui, Z., Li, M., & Guo, P. (2017). Simulation-based inexact fuzzy semi-infinite programming method for agricultural cultivated area planning in the Shiyang River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(2), 05016011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001118)

Guan, X., Mascaro, G., Sampson, D., & Maciejewski, R. (2020). A metropolitan scale water management analysis of the food-energy-water nexus. *Science of the Total Environment*, 701, 134478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134478>

Ilbahar, E., Kahraman, C., & Cebi, S. (2021). Location selection for waste-to-energy plants by using fuzzy linear programming. *Energy*, 234, 121189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121189>

Jana, C., & Chattopadhyay, R. N. (2005). Direct energy optimization for sustainable agricultural operation-a fuzzy linear programming approach. *Energy for Sustainable Development*, 9(3), 5-12. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60517-7](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60517-7)

Kang, S., Hao, X., Du, T., Tong, L., Su, X., Lu, H., ... & Ding, R. (2017). Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. *Agricultural Water Management*, 179, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.007>

Kamber, E., Aydoğmuş, U., Aydoğmuş, H. Y., Gümüş, M., & Kahraman, C. (2024). Prioritization of drip-irrigation pump alternatives in agricultural applications: an integrated picture fuzzy BWM&CODAS methodology. *Applied Soft Computing*, 154, 111308. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111308>

Karmakar, S., Seikh, M. R., & Castillo, O. (2021). Type-2 intuitionistic fuzzy matrix games based on a new distance measure: Application to biogas-plant implementation problem. *Applied Soft Computing*, 106, 107357. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107357>

Khare, D., & Jat, M. K. (2006). Assessment of conjunctive use planning options: A case study of Sapon irrigation command area of Indonesia. *Journal of Hydrology*, 328(3-4), 764-777. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.01.018>

Kousar, S., Zafar, A., Kausar, N., Pamucar, D., & Kattel, P. (2022). Fruit production planning in semiarid zones: a novel triangular intuitionistic fuzzy linear programming approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 3705244. <https://doi.org/10.1155/2022/3705244>

Jacobs, K., Lebel, L., Buizer, J., Addams, L., Matson, P., McCullough, E., ... & Finan, T. (2016). Linking knowledge with action in the pursuit of sustainable water-resources management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(17), 4591-4596. <https://doi.org/10.1073/pnas.0813125107>

Laskookalayeh, S. S., Najafabadi, M. M., & Shahnazari, A. (2022). Investigating the effects of management of irrigation water distribution on farmers' gross profit under uncertainty: A new positive mathematical programming model. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131277>

Li, Y. P., Huang, G. H., Wang, G. Q., & Huang, Y. F. (2009). FSWM: a hybrid fuzzy-stochastic water-management model for agricultural sustainability under uncertainty. *Agricultural water management*, 96(12), 1807-1818. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.019>

Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., & Liu, D. (2018). An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 196, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.016>

Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Ma, M., & Liu, X. (2017). An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable

- irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*, 555, 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.055>
- Li, X., Huang, G., Wang, S., Li, Y., Zhang, X., & Zhou, X. (2022). An interval two-stage fuzzy fractional programming model for planning water resources management in the coastal region—A case study of Shenzhen, China. *Environmental Pollution*, 306, 119343. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119343>
- Lu, H., Huang, G., & He, L. (2011). An inexact rough-interval fuzzy linear programming method for generating conjunctive water-allocation strategies to agricultural irrigation systems. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9), 4330-4340. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.03.008>
- Lu, H. W., Huang, G. H., & He, L. (2012). Simulation-based inexact rough-interval programming for agricultural irrigation management: a case study in the Yongxin County, China. *Water resources management*, 26, 4163-4182. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0138-6>
- Liu, M., Huang, G. H., Liao, R. F., Li, Y. P., & Xie, Y. L. (2013). Fuzzy two-stage non-point source pollution management model for agricultural systems—A case study for the Lake Tai Basin, China. *Agricultural Water Management*, 121, 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.01.006>
- Naciones Unidas (2025). Una población en crecimiento. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Nematian, J. (2023). A Two-Stage Stochastic Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming Approach for Water Resource Allocation under Uncertainty in Ajabshir Qaleh Chay Dam. *Journal of Environmental Informatics*, 41(1). <https://doi.org/10.3808/jei.202300487>
- Ning, S. K., & Chang, N. B. (2004). Optimal expansion of water quality monitoring network by fuzzy optimization approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 91, 145-170. <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000009233.98215.1f>
- Niquin-Alayo, E., Vergara-Moreno, E., & Calderón-Niquin, M. (2018). FERTIDIF: software para la planificación de fertilización agrícola basado en optimización lineal con costos difusos. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 103-112. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.11>
- Ou, G., Tan, S., Zhou, M., Lu, S., Tao, Y., Zhang, Z., ... & Wu, G. (2017). An interval chance-constrained fuzzy modeling approach for supporting land-use planning and eco-environment planning at a watershed level. *Journal of environmental management*, 204, 651-666. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.021>
- Pan, X. H., Wang, Y. M., He, S. F., Labella, Á., & Martínez, L. (2023). An interval type-2 fuzzy ORESTE method for waste-to-energy plant site selection: a case study in China. *Applied Soft Computing*, 136, 110092. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110092>
- Perez, R. R., Battle, V. F., & Rodríguez, L. S. (2007). Robust system identification of an irrigation main canal. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1785-1796. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.002>
- Qadir, M., Sharma, B. R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., & Karajeh, F. (2007). Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural water management*, 87(1), 2-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.018>
- Raju, K. S., & Duckstein, L. (2003). Multiobjective fuzzy linear programming for sustainable irrigation planning: an Indian case study. *Soft Computing*, 7(6), 412-418. <https://doi.org/10.1007/s00500-002-0230-6>
- Ren, C., Guo, P., Tan, Q., & Zhang, L. (2017). A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.185>
- Rodríguez, E. R. V., & Martínez-López, Y. (2019). Decision-Making in Agriculture with the Use of Fuzzy Mathematical Models. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(2), 1-6. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1121>
- Rouyendegh, B. D., & Savalan, Ş. (2022). An integrated fuzzy MCDM hybrid methodology to analyze agricultural production. *Sustainability*, 14(8), 4835. <https://doi.org/10.3390/su14084835>
- Rong, Q., Cai, Y., Su, M., Yue, W., Dang, Z., & Yang, Z. (2019). Identification of the optimal agricultural structure and population size in a reservoir watershed based on the water ecological carrying capacity under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 234, 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.179>
- Srivastava, P., & Singh, R. M. (2015). Optimization of cropping pattern in a canal command area using fuzzy programming approach. *Water Resources Management*, 29, 4481-4500. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1071-2>
- Tang, Y., Zhang, F., Wang, S., Zhang, X., Guo, S., & Guo, P. (2019). A distributed interval nonlinear multiobjective programming approach for optimal irrigation water management in an area. *Agricultural water management*, 220, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.052>
- Vergara, E. R., & Neyra Salvador, C. (2021). Fuzzy model and method for farmland fertilization planning. *Selecciones Matemáticas*, 8(02), 370-378. <https://doi.org/10.17268/sel.mat.2021.02.13>
- Wang, Y., Guo, S. S., & Guo, P. (2022). Crop-growth-based spatially-distributed optimization model for irrigation water resource management under uncertainties and future climate change. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131182>
- Yani, M., Asrol, M., Hambali, E., Papilo, P., Mursidah, S., & Marimin, M. (2022). An adaptive fuzzy multi-criteria model for sustainability assessment of sugarcane agroindustry supply chain. *IEEE Access*, 10, 5497-5517. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140519>
- Yang, G., Guo, P., Li, M., Fang, S., & Zhang, L. (2016). An improved solving approach for interval-parameter programming and application to an optimal allocation of irrigation water problem. *Water resources management*, 30, 701-729. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1186-5>
- Yue, Q., & Guo, P. (2021). Managing agricultural water-energy-food-environment nexus considering water footprint and carbon footprint under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 252, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106899>
- Yuan, G. Q., Liu, Y. H., & Cao, C. (2011). Fuzzy crop production planning expected value model with credibility constraints. Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) 1, 630-634. IEEE. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2011.6019531>
- Zhang, X., Huang, G. H., & Nie, X. (2009). Optimal decision schemes for agricultural water quality management planning with imprecise objective. *Agricultural Water Management*, 96(12), 1723-1731. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.011>
- Zhang, Y., & Huang, G. (2010). Fuzzy robust credibility-constrained programming for environmental management and planning. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(6), 711-721. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.6.711>
- Zhang, Y. M., & Huang, G. H. (2011). Inexact credibility constrained programming for environmental system management. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(4), 441-447. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.007>
- Zhang, Y. M., Lu, H. W., Nie, X. H., He, L., & Du, P. (2014). An interactive inexact fuzzy bounded programming approach for agricultural water quality management. *Agricultural Water Management*, 133, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.003>
- Zhang, C., & Guo, P. (2018). FLFP: A fuzzy linear fractional programming approach with double-sided fuzziness for optimal irrigation water allocation. *Agricultural Water Management*, 199, 105-119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.013>
- Zhang, C., Yang, G., Wang, C., & Huo, Z. (2023). Linking agricultural water-food-environment nexus with crop area planning: a fuzzy credibility-based multi-objective linear fractional programming approach. *Agricultural Water Management*, 277, 108135. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108135>
- Zuo, Q., Wu, Q., Yu, L., Li, Y., & Fan, Y. (2021). Optimization of uncertain agricultural management considering the framework of water, energy and food. *Agricultural Water Management*, 253, 106907. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106907>