



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**PLAN DE MEJORA DE UNA
EXPLOTACIÓN MULTICULTIVO
EN MAYORGA**

Autor: **David Medina Alonso**

Director: **Antonio García de Garmendia**

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Plan de mejora de una explotación multicultivo en Mayorga

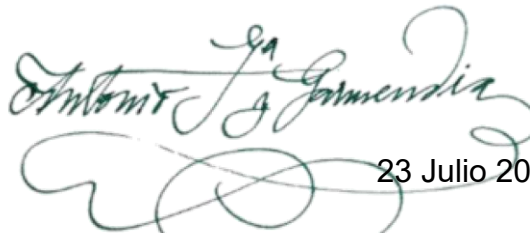
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2023/24** es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: David

Fecha: 22/ 07/ 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

A handwritten signature in black ink, reading "Antonio García y Garmendia". The signature is written in a cursive style with a large, decorative flourish at the end.

23 Julio 2024

Fdo.: Antonio García y Garmendia

Fecha: 23/07/2024

PLAN DE MEJORA DE UNA EXPLOTACIÓN MULTICULTIVO EN MAYORGA

Autor: Medina Alonso, David.

Director: García de Garmendía, Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Creación de un plan de mejora de una explotación multicultivo en Mayorga de Campos. Se busca maximizar la rentabilidad de la explotación agrícola mediante la optimización de los cultivos y el uso eficiente de los recursos disponibles. Se elabora un análisis detallado de los rendimientos de los cultivos actuales, identificando los cultivos más rentables a través de la programación lineal y evaluando su sensibilidad ante fluctuaciones en sus variables claves. Se desarrolla un modelo matemático robusto implementado en Matlab que maximiza la rentabilidad económica de la explotación. Este modelo constituye una herramienta efectiva para la toma de decisiones informadas sobre la gestión de cultivos, permitiendo ajustar las estrategias de cultivo según las variaciones del mercado y las características propias de la explotación. Posteriormente, se idea un plan de cultivos que optimiza la gestión de los recursos disponibles, incluyendo el uso de energía solar para el riego. Además, se realiza un análisis de riesgos y retornos para optimizar un plan de cultivos alternativo que minimice el riesgo asumido, utilizando herramientas como el Modelo de Markowitz y el indicador VaR.

Palabras clave: plan de cultivos, programación lineal, optimización, riesgos y retorno.

1. Introducción

Las producciones agrícolas están siendo optimizadas por prácticas avanzadas como la aplicación de fertilizantes selectivos o la implementación de la agricultura de precisión. Estos avances tecnológicos permiten aumentar los rendimientos de las explotaciones agrícolas por su capacidad para incrementar el volumen de las producciones obtenidas.

Por otro lado, encontramos herramientas que nos permiten identificar los cultivos más rentables en cada campaña, aumentando la rentabilidad total de la explotación si se logra crear un plan de cultivos adecuado.

Finalmente, la administración de portafolios es capaz de asimilarse a la actividad agrícola. Su implementación en este sector es capaz de orientar las inversiones agrícolas y ajustar los planes de cultivo, bajo diferentes escenarios de riesgo.

2. Definición del proyecto

Este proyecto busca maximizar la rentabilidad de la explotación multicultivo en Mayorga de Campos, creando un modelo robusto que sirve como una herramienta integral de gestión agrícola. El modelo optimiza la elección de cultivos y el uso eficiente de los recursos, incluyendo la energía y el agua. Tras contrastar sus hipótesis y evaluar la sensibilidad de sus variables claves, el modelo identifica la combinación de cultivos cuya rentabilidad sería superior a la registrada anteriormente en la explotación. Su implementación y ajuste a las limitaciones específicas de la explotación permiten crear un plan de cultivo óptimo para las próximas campañas. Además, se analiza el riesgo y el retorno de nuestro plan de cultivos, y se desarrolla un plan de cultivos alternativo que minimiza el riesgo asumido.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Se implementa un modelo matemático basado en la programación lineal para maximizar la rentabilidad económica de nuestra explotación agrícola. Utilizando datos históricos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, establecimos la función objetivo y las restricciones pertinentes, asegurando que el modelo se ajuste a las condiciones específicas de la explotación. Tras ejecutar este modelo en Matlab, obtuvimos un plan de cultivos que nos hubiera proporcionado la máxima rentabilidad económica en cada una de las campañas. Validamos la robustez del modelo, contrastando sus hipótesis en Python con pruebas estadísticas como el análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba T de Student, y evaluando la sensibilidad de sus variables claves en Matlab. Analizando los resultados del modelo, identificamos las combinaciones de cultivo más rentables y creamos planes de cultivo implementando las mejoras halladas.

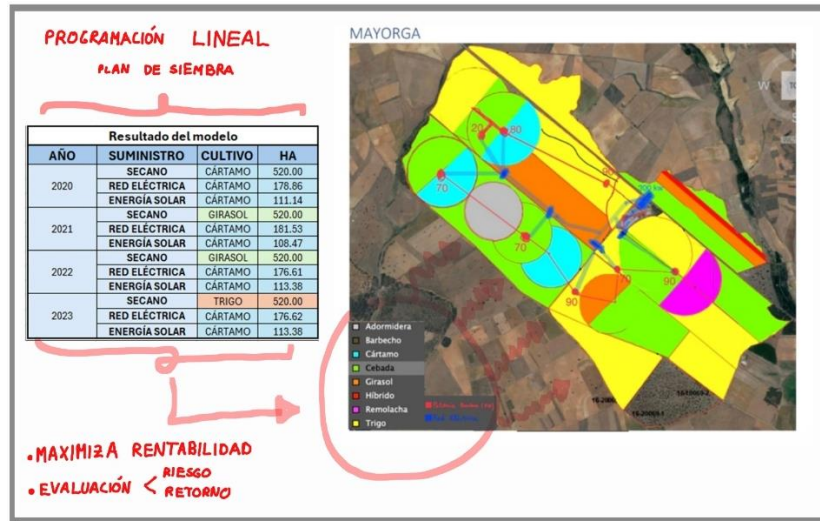


Ilustración 1 - Esquema de la implementación del plan de cultivo resultante.

Finalmente, extrapolamos conceptos de la administración de portafolios financieros al plan de cultivo propuesto e implementamos herramientas como el Modelo de Markowitz y el indicador VaR.

4. Resultados

Este fue el plan de cultivos obtenido ejecutando nuestro modelo con Matlab para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Resultado del modelo			
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14
2021	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47
2022	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.61
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38
2023	SECANO	TRIGO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38

Ilustración 2 - Resultados del plan de cultivo con mayor rentabilidad. Elaboración propia. (2024).

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00	104000.00	62400.00	41600.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86	143088.00	62601.00	80487.00	541745.48
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14	88910.40	19015.61	69894.79	336623.67
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	197600.00	89122.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	145225.28	63536.06	81689.22	563372.43
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	86776.00	18081.42	68694.58	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	291200.00	111431.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.61	141288.00	61813.50	79474.50	524342.73
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90704.00	19800.68	70903.32	336617.28
2023	SECANO	TRIGO	520.00	254925.22	209040.00	45885.22	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62	141293.84	61816.06	79477.79	582084.70
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90706.16	17612.52	73093.64	373679.90

Ilustración 3 - Desglose económico del plan de cultivo resultante para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Este fue el plan de mejora propuesto para las campañas de 2024 a 2033, implementando las mejores observadas en los resultados.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2025	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2027	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2030	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2032	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Ilustración 4 - Plan de mejora de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).

AÑO	TIPOLOGÍA	CULTIVO	Ha
2044-2047	SECANO	CEBADA	127.5
		TRIGO	127.5
		CÁRTAMO	127.5
		GIRASOL	127.5
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	45.6
		TRIGO	45.6
		CÁRTAMO	45.6
		GIRASOL	45.6
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	45.6
		CEBADA	21.5
		TRIGO	21.5
		CÁRTAMO	21.5
		GIRASOL	21.5
		REMOLACHA	21.5

Ilustración 5 - Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).

Este fue el plan de mejora alternativo con mínimo riesgo propuesto para las campañas de 2024 a 2033, tras analizar los riesgos y retornos de cada cultivo.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2025	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2027	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2030	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2032	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Ilustración 6 - Plan de mejora alternativo con mínimo riesgo de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).

5. Conclusiones

La implementación de este modelo matemático y la elaboración de planes de cultivo ajustados a las condiciones específicas de la explotación y del mercado, han conseguido

generar una base sólida para futuras campañas, permitiendo no solo maximizar la rentabilidad, sino también gestionar de manera efectiva los riesgos asociados.

6. Referencias

[1] Valero Ubi22erna, C., Navas Gracia, L. M., González Herrero, F., Gómez Gil, J., Ruiz Ruiz, G., Barreiro Elorza, P., ... & Garrido Izard, M. (2010). *Ahorro y eficiencia energética en la Agricultura de Precisión*. Artículo de investigación, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid.

[2] Mosquera, (2011). Diseño de un modelo de Planificación de cultivos para mejorar el desempeño de pequeñas y medianos productores de papa. Trabajo de fin de grado, Universidad de la Sabana, Colombia.

IMPROVEMENT PLAN FOR A MULTI-CROP IN MAYORGA

Author: Medina Alonso, David.

Supervisor: García de Garmendía, Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

The aim of this project is to maximize the profitability of the farm through the optimization of crops and the efficient use of available resources. A detailed analysis of current crop yields is elaborated, identifying the most profitable crops through linear programming and evaluating their sensitivity to fluctuations in their key variables. A robust mathematical model implemented in Matlab is developed to maximize the economic profitability of the farm. This model constitutes an effective tool for making informed decisions on crop management, allowing crop strategies to be adjusted according to market variations and the farm's own characteristics. Subsequently, a crop plan is devised that optimizes the management of available resources, including the use of solar energy for irrigation. In addition, a risk and return analysis is carried out to optimize an alternative crop plan that minimizes the assumed risk, using tools such as the Markowitz Model and the VaR indicator.

Keywords: crop plan, linear programming, optimization, risks and returns.

1. Introduction

Agricultural productions are being optimized by advanced practices such as the application of selective fertilizers or the implementation of precision agriculture. These technological advances increase farm yields due to their capacity to increase the volume of production obtained.

On the other hand, we find tools that allow us to identify the most profitable crops in each season. Therefore, we will be able to increase the total profitability of the farm with the adequate crop plan.

Finally, portfolio management can be assimilated to agricultural activity. Its implementation in this sector is capable of guiding agricultural investments and adjusting crop plans under different risk scenarios.

2. Definition of the project

This project seeks to maximize the profitability of the multi-crop farm in Mayorga de Campos by creating a robust model that serves as a comprehensive farm management tool. The model optimizes the choice of crops and the efficient use of resources, including energy and water. After testing its assumptions and assessing the sensitivity of its key variables, the model identifies the combination of crops whose profitability would be superior to that previously recorded on the farm. Its implementation and adjustment to the specific constraints of the farm allow the creation of an optimal cropping plan for the upcoming seasons. In addition, the risk and return of our crop plan is analyzed, and an alternative crop plan that minimizes the risk assumed is developed.

3. Description of the model/system/software.

A mathematical model is implemented to maximize the profitability of the farm. Using historical data from the 2020, 2021, 2022 and 2023 seasons, we established the objective function and the relevant constraints, ensuring that the model fits the specific conditions of the farm. After running this model in Matlab, we obtained a crop plan that would have provided us with the maximum economic profitability in each of the campaigns. We validated the robustness of the model, contrasting its hypotheses in Python with statistical tests such as analysis of variance (ANOVA) and Student's t-test, and evaluating the sensitivity of its key variables in Matlab. Analyzing the model results, we identified the most profitable crop combinations and created cropping plans implementing the improvements reached.

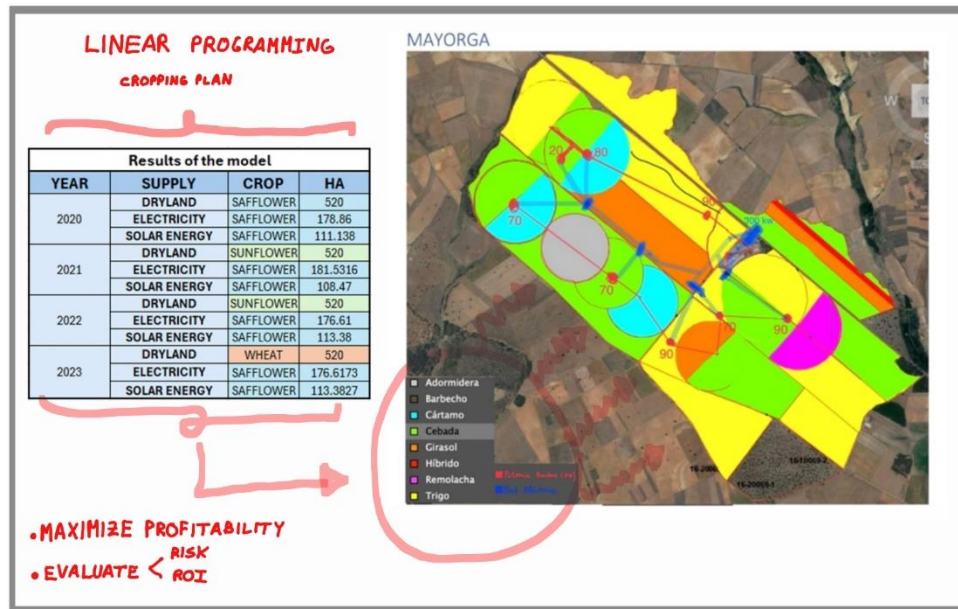


Illustration 7 - Schematic of the implementation of the cropping plan obtained. Source: the author. (2024).

4. Results

Crop plan obtained through by running our model with Matlab for the 2020, 2021, 2022 and 2023 campaigns.

Results of the model			
YEAR	SUPPLY	CROP	HA
2020	DRYLAND	SAFFLOWER	520
	ELECTRICITY	SAFFLOWER	178.86
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	111.138
2021	DRYLAND	SUNFLOWER	520
	ELECTRICITY	SAFFLOWER	181.5316
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.47
2022	DRYLAND	SUNFLOWER	520
	ELECTRICITY	SAFFLOWER	176.61
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	113.38
2023	DRYLAND	WHEAT	520
	ELECTRICITY	SAFFLOWER	176.6173
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	113.3827

Illustration 8 - Results of the most profitable crop plan. Source: the author. (2024).

YEAR	CATEGORY	CROP	HA	Income(€)	Cost (€)	Net profit (€)	Water consumption (m3)
2020	RAINFED	SAFFLOWER	520.00	104000.00	62400.00	41600.00	0.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	178.86	143088.00	62601.00	80487.00	541745.48
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	111.14	88910.40	19015.61	69894.79	336623.67
2021	RAINFED	SUNFLOWER	520.00	286722.75	197600.00	89122.75	0.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	181.53	145225.28	63536.06	81689.22	563372.43
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.47	86776.00	18081.42	68694.58	336630.14
2022	RAINFED	SUNFLOWER	520.00	402631.06	291200.00	111431.06	0.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	176.61	141288.00	61813.50	79474.50	524342.73
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	113.38	90704.00	19800.68	70903.32	336617.28
2023	RAINFED	WHEAT	520.00	254925.22	209040.00	45885.22	0.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	176.62	141293.84	61816.06	79477.79	582084.70
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	113.38	90706.16	17612.52	73093.64	373679.90

Illustration 9 – Breakdown of the resulting crop plan for the 2020, 2021, 2022 and 2023 seasons. Source: the author. (2024).

This was the proposed improvement plan for the 2024 to 2033 seasons, implementing the improvements observed in the results.

YEAR	SUPPLY	CROP	HA
2024	RAINFED	WHEAT	520
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	233.51
	SOLAR ENERGY	BEET	56.49
2025	RAINFED	SAFFLOWER	520
	ELECTRICITY GRID	BEET	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62
2026	RAINFED	WHEAT	520
	ELECTRICITY GRID	FALLOW	233.51
	SOLAR ENERGY	BEET	56.49
2027	RAINFED	SAFFLOWER	520
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	233.51
	SOLAR ENERGY	FALLOW	56.49
2028	RAINFED	FALLOW	520
	ELECTRICITY GRID	BEET	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62
2029	RAINFED	WHEAT	520
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	233.51
	SOLAR ENERGY	BEET	56.49
2030	RAINFED	SAFFLOWER	520
	ELECTRICITY GRID	BEET	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62
2031	RAINFED	WHEAT	520
	ELECTRICITY GRID	FALLOW	233.51
	SOLAR ENERGY	BEET	56.49
2032	RAINFED	SAFFLOWER	520
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	233.51
	SOLAR ENERGY	FALLOW	56.49
2033	RAINFED	FALLOW	520
	ELECTRICITY GRID	BEET	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62

Illustration 10 - Improvement plan for the 2024-2033 campaigns for each surface category. Source: the author. (2024).

YEAR	CATEGORY	CROP	Ha
2044-2047	RAINFED	BARLEY	127.5
		WHEAT	127.5
		SAFFLOWER	127.5
		SUNFLOWER	127.5
	ELECTRICITY GRID	BARLEY	45.6
		WHEAT	45.6
		SAFFLOWER	45.6
		SUNFLOWER	45.6
		BEET	45.6
	SOLAR ENERGY	BARLEY	21.5
		WHEAT	21.5
		SAFFLOWER	21.5
SUNFLOWER		21.5	
		BEET	21.5

Illustration 11 - Crop plan for the transitional stage from 2044 to 2047. Source: the author. (2024).

This was the alternative improvement plan with minimum risk proposed for the 2024 to 2033 seasons, after analyzing the risks and returns of each crop.

YEAR	CATEGORY	CROP	HA
2024	RAINFED	SUNFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	112.69
	SOLAR ENERGY	BARLEY	177.31
2025	RAINFED	SAFFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	BARLEY	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62
2026	RAINFED	SUNFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	FALLOW	112.69
	SOLAR ENERGY	BARLEY	177.31
2027	RAINFED	SAFFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	233.51
	SOLAR ENERGY	FALLOW	56.49
2028	RAINFED	FALLOW	520.00
	ELECTRICITY GRID	BARLEY	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62
2029	RAINFED	SUNFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	112.69
	SOLAR ENERGY	BARLEY	177.31
2030	RAINFED	SAFFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	BARLEY	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62
2031	RAINFED	SUNFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	FALLOW	112.69
	SOLAR ENERGY	BARLEY	177.31
2032	RAINFED	SAFFLOWER	520.00
	ELECTRICITY GRID	SAFFLOWER	233.51
	SOLAR ENERGY	FALLOW	56.49
2033	RAINFED	FALLOW	520.00
	ELECTRICITY GRID	BARLEY	181.38
	SOLAR ENERGY	SAFFLOWER	108.62

Illustration 12 - Alternative improvement plan with minimum risk for the 2024-2033 seasons for each area category. Source: the author. (2024).

5. Conclusions

The implementation of this mathematical model and the elaboration of crop plans adjusted to the specific conditions of the farm and the market, have managed to generate a solid base for future campaigns. This has not only allowed maximizing profitability, but also effectively overcoming the associated risks.

6. References

- [1] Valero Ubi22erna, C., Navas Gracia, L. M., González Herrero, F., Gómez Gil, J., Ruiz Ruiz, G., Barreiro Elorza, P., ... & Garrido Izaola, M. (2010). *Ahorro y eficiencia energética en la Agricultura de Precisión*. Artículo de investigación, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid.
- [2] Mosquera, (2011). Diseño de un modelo de Planificación de cultivos para mejorar el desempeño de pequeñas y medianas productoras de papa. Trabajo de fin de grado, Universidad de la Sabana, Colombia.

Índice de contenido

1. Introducción y planteamiento del proyecto:	1
Contexto y relevancia.	1
Descripción detallada de la finca.....	4
Justificación del proyecto.	10
Objetivos generales y específicos.....	11
2. Descripción de las tecnologías y estado de la técnica:	14
Optimización de la rentabilidad agrícola.....	14
Teoría de portafolios y análisis de riesgos:.....	18
Otras vías de mejora:	21
3. Definición del modelo y planteamiento de hipótesis.....	24
Objetivos y especificaciones técnicas del modelo.....	24
Elaboración del modelo matemático y sus variables.....	25
Planteamiento de hipótesis.	27
Planteamiento de diferentes escenarios.	28
4. Desarrollo del modelo y contrastación de las hipótesis.....	41
Ejecución del modelo desarrollado.....	41
Contraste de hipótesis entre las hipótesis hechas.	51
5. Análisis de resultados:.....	64
Resultados del caso base.....	64
Análisis de sensibilidad	67

6. _Análisis económico:	83
Impacto en nuestra explotación	84
7. _Evaluación de riesgo y retorno:	98
Implementación del Modelo de Markowitz y del indicador VAR.....	103
8. _Conclusiones y recomendaciones:	108
Conclusiones sobre la metodología.	112
Conclusiones sobre el impacto de las mejoras.	113
Recomendaciones para futuros estudios.....	114
9. _Bibliografía:	115
Bibliografía	115
10. _Apéndices:	118
Anexo 1	119
Anexo 2	121
Anexo 3	124
Anexo 4	143
Anexo 5	147
Anexo 6	151

Índice de figuras

Figura 1: Cadena de valor tradicional del sector agroalimentario español. MAPAMA. (2017).	2
Figura 2: Plan de cultivos, campaña 2023. MAPAMA. (2017).	4
Figura 3: Consumo eléctrico durante la campaña de 2023. INGECON SUNMonitor. (2023).	6
Figura 4: Energía solar de onda corta incidente diario promedio en Mayorga. NASA. (2023).	7
Figuras 5, 6 y 7: Condiciones climatológicas de un año promedio en Mayorga de campos. NASA. (2023).	10
Figura 8: Evolución temporal de los beneficios de los cultivos de secano para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	44
Figura 9: Evolución temporal de los beneficios de los cultivos de regadío con red eléctrica para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	44
Figura 10: Evolución temporal de los beneficios de los cultivos de regadío energía solar para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	45
Figura 11: Evolución temporal de los gastos en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia (2024).	46
Figura 12: Gráficas que muestran la relación entre la cantidad de agua y rentabilidad. Elaboración propia. (2024).	56
Figura 13: Suministro máximo de agua en m³ de la infraestructura. Elaboración propia. (2024).	62
Figura 14: Hectáreas de secano que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	66

Figura 15: Hectáreas regadas a través de la red eléctrica que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024)..	66
Figura 16: Hectáreas regadas a través de energía solar que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024)..	67
Figura 17: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones de sus precios en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	70
Figura 18: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones de sus precios en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).....	70
Figura 19: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones de sus precios en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).....	71
Figura 20: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones en su producción en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	73
Figura 21: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones en su producción en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).....	74
Figura 22: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones en su producción en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).....	74
Figura 23: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones en su coste en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	76
Figura 24: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones en su coste en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	77

Figura 25: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones en su coste en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	77
Figura 26: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones en su consumo hídrico en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	79
Figura 27: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones en su consumo hídrico en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	80
Figura 28: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones en su consumo hídrico en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	80
Figura 29: Diagrama Polar comparando los beneficios totales promedio de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	85
Figura 30: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	86
Figura 31: Diagrama Polar comparando los beneficios totales promedio de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	87
Figura 32: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	88
Figura 33: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales reales y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	92
Figura 34: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	93

Figura 35: Evaluación de precios por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024). 100

Índice de tablas

Tabla 1: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 si la pareja de cultivos con mayor rentabilidad es la misma para tres categorías de superficie. Elaboración propia. (2024).	30
Tabla 2: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 si la pareja de cultivos con mayor rentabilidad es la misma para dos categorías de superficie. Elaboración propia. (2024).	30
Tabla 3: Producciones promedio en los cultivos de regadío de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).	37
Tabla 4: Producciones promedio en los cultivos de secano de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).	37
Tabla 5: Necesidades hídricas promedio en los cultivos de secano de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).	38
Tabla 6: Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).	39
Tablas 7 y 8: Datos históricos de los beneficios promedio por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	43
Tabla 9: Registro históricos de los gastos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	46
Tabla 10: Consumo hídricos y coste eléctrico por cultivo de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	47
Tabla 11 y 12: Desglose de costes por cultivos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	48

Tabla 13: Desglose de los costes del cártamo con las condiciones contractuales en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	49
Tabla 14: Necesidades hídricas anuales promedio registradas en m³/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	49
Tabla 15: Beneficios en € por cultivo y campaña, obtenidos por la ejecución del modelo matemático propuesto. Elaboración propia. (2024).	52
Tabla 16 y 17: Resultados obtenidos del análisis de varianza de un factor. Elaboración propia. (2024).	53
Tabla 18: Comparación por cultivos de la rentabilidad y necesidades hídricas por cultivos en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	54
Tabla 19, 20, 21, 22 y 23: Beneficios en €/ha por cultivo y campaña obtenidos de los datos históricos de las campañas 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	58
Tabla 24, 25, 26, 27 y 28: Resultados obtenidos de la prueba t para las medias de dos muestras. Elaboración propia. (2024).	59
Tabla 29: Plan de cultivos en hectáreas eléctrica que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	60
Tabla 30: Promedio de datos históricos sobre las necesidades hídricas mensuales en m³/ha. Elaboración propia. (2024).	61
Tabla 31, 32, 33 y 34: Necesidades hídricas totales y mensuales en m³ del cártamo para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	63
Tabla 35: Plan de cultivos en hectáreas regadas a través de la red eléctrica que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024)	65
Tabla 36: Plan de cultivos en hectáreas regadas a través de energía solar que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.	65

Tabla 37: Resultados obtenidos para cada cultivo seleccionado tras optimizar los beneficios de la explotación de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	69
Tabla 38: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en los precios de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	71
Tabla 39: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en los precios de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	72
Tabla 40: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en las producciones agrícolas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	75
Tabla 41: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en las producciones agrícolas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	75
Tabla 42: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en los costos de producción de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	78
Tabla 43: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en los costos de producción de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	78
Tabla 44: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en las necesidades hídricas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	81
Tabla 45: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en las necesidades hídricas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	81
Tabla 46: Resumen de los cultivos de regadío con una alta sensibilidad a variaciones de más menos 10% en cada variable. Elaboración propia. (2024).	82

Tabla 47: Resumen de los cultivos de secano con una alta sensibilidad a variaciones de más menos 10% en cada variable. Elaboración propia. (2024).....	82
Tabla 48: Desglose económico del plan de cultivo propuesto para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	84
Tabla 49: Comparación de los beneficios netos totales reales y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	85
Tabla 50: Resultados promedio esperados para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	87
Tabla 51: Comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).....	88
Tabla 52: Resultados obtenidos para cada cultivo seleccionado tras optimizar, sin el cártamo, los beneficios de la explotación de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	91
Tabla 53: Comparación de los beneficios netos totales reales y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	91
Tabla 54: Comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	93
Tabla 55: Cultivos seleccionados para nuestro plan de cultivos optimizado. Elaboración propia. (2024).	94
Tabla 56: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).....	95
Tabla 57: Estimación de la rentabilidad obtenida en la campaña de 2024 siguiendo el plan de cultivo propuesto. Elaboración propia. (2024).	96
Tabla 58: Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).	96

Tabla 59: Datos históricos de los precios por tonelada de los cultivos de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	98
Tabla 60: Datos históricos de las producciones por hectárea de los cultivos de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	99
Tabla 61: Matriz de correlaciones por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	99
Tabla 62: Matriz de correlaciones por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	101
Tabla 63: Plan de mejora original de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).	102
Tabla 64: Plan de mejora alternativo con mínimo riesgo de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).	103
Tabla 65: Datos históricos de los retornos por hectárea de los cultivos dependientes de fuentes fósiles de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	104
Tabla 66: Datos históricos de los retornos por hectárea de los cultivos dependientes de energía solar de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	104
Tabla 67: Matriz de covarianza de los retornos históricos por hectárea de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	105
Tabla 68: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).	109
Tabla 69: Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).	110
Tabla 70: Plan de mejora alternativo con mínimo riesgo de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).	111
Tabla 71: Plan de cultivos de la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).	121

Tabla 72: Datos históricos de las producciones, costes y beneficios por cultivo regados a través de la red eléctrica de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	125
Tabla 73: Datos históricos de los beneficios por cultivo regados a través de energía solar de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	125
Tabla 74: Necesidades hídricas anuales registradas en m³/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	125
Tabla 75: Desglose económico del escenario optimista de un supuesto aumento del 10 % en los precios por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	126
Tabla 76: Desglose económico del escenario pesimista de una supuesta reducción del 10 % en los precios por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	128
Tabla 77: Desglose económico del escenario optimista de un supuesto aumento del 10 % en la producción por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	130
Tabla 78: Desglose económico del escenario pesimista de una supuesta reducción del 10 % en la producción por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	132
Tabla 79: Desglose económico del escenario pesimista de un supuesto aumento del 10 % en los costos por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	134
Tabla 80: Desglose económico del escenario optimista de una supuesta reducción del 10 % en los costos por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	136
Tabla 81: Desglose económico del escenario pesimista de un supuesto aumento del 10 % en las necesidades hídricas por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	138

Tabla 82: Resultados de un aumento del 10% en las necesidades hídricas anuales registradas en m³/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	139
Tabla 83: Desglose económico del escenario optimista de una supuesta reducción del 10 % en las necesidades hídricas por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	141
Tabla 84: Resultados de una reducción del 10% en las necesidades hídricas anuales registradas en m³/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	142
Tabla 85: Datos históricos de las producciones, costes y beneficios promedio por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	144
Tabla 86: Datos históricos de los beneficios promedio por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	144
Tabla 87: Necesidades hídricas anuales promedio registradas en m³/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	145
Tabla 88: Resultados promedio esperados para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	147
Tabla 89: Datos históricos de las producciones, costes y beneficios promedio por cultivo regados usando la red eléctrica de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	148
Tabla 90: Datos históricos de los beneficios promedio por cultivo regados usando la energía solar de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	148
Tabla 91: Resultados obtenidos para cada cultivo seleccionado tras optimizar, sin el cártamo, los beneficios de la explotación de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).	151
Tabla 92: Necesidades hídricas promedio en los cultivos de secano de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).	152

Tabla 93: Superficie promedio suministrada por energía solar disponible por cultivo.

Elaboración propia. (2024). 153

1. _Introducción y planteamiento del proyecto:

Este apartado tratará de contextualizar los desafíos actuales del sector agrícola español, y de analizar la modernización que está transformando las explotaciones agrarias hacia sistemas más tecnificados y eficientes. También se hará una descripción detallada de la explotación agrícola y de su climatología, se justificará la motivación detrás de este proyecto y se expondrán sus objetivos.

Contexto y relevancia.

El sector agrícola español atraviesa una complicada etapa fuertemente marcada por la falta de mano de obra a consecuencia de la despoblación del medio rural, la disminución del terreno fértil (supone un 33,6% del territorio nacional), el cambio climático, la escasez de los recursos hídricos debido a los menguantes acuíferos, o la falta de competitividad en un mercado globalizado¹. De hecho, en 2016 en torno a 4000 municipios (casi la mitad del total) estaban en riesgo de despoblación². De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación el volumen de trabajo de la agricultura expresado en UTAs (Unidades de Trabajo Año) disminuyó un 4,6% y el valor de la producción vegetal disminuyó un 2,2% respecto al año anterior.³ Además, el CEDEX contempla una importante problemática que concierne a la reposición de los acuíferos al estimar que la diferencia entre agua extraída y repuesta aumentará un 8% para 2040 y 27% para 2100, siendo los grandes consumidores de agua el sector agroalimentario, hogares e industria⁴. Estos factores podrían ocasionar una fuerte debilitación del sector, lo que afectaría a todos los agentes involucrados en esta cadena de valor tradicional.

¹ Morrás Lorenzo. (2018).

² INE. (2017).

³ Ministeria de Agricultura. (2024).

⁴ CEDEX. (2017).

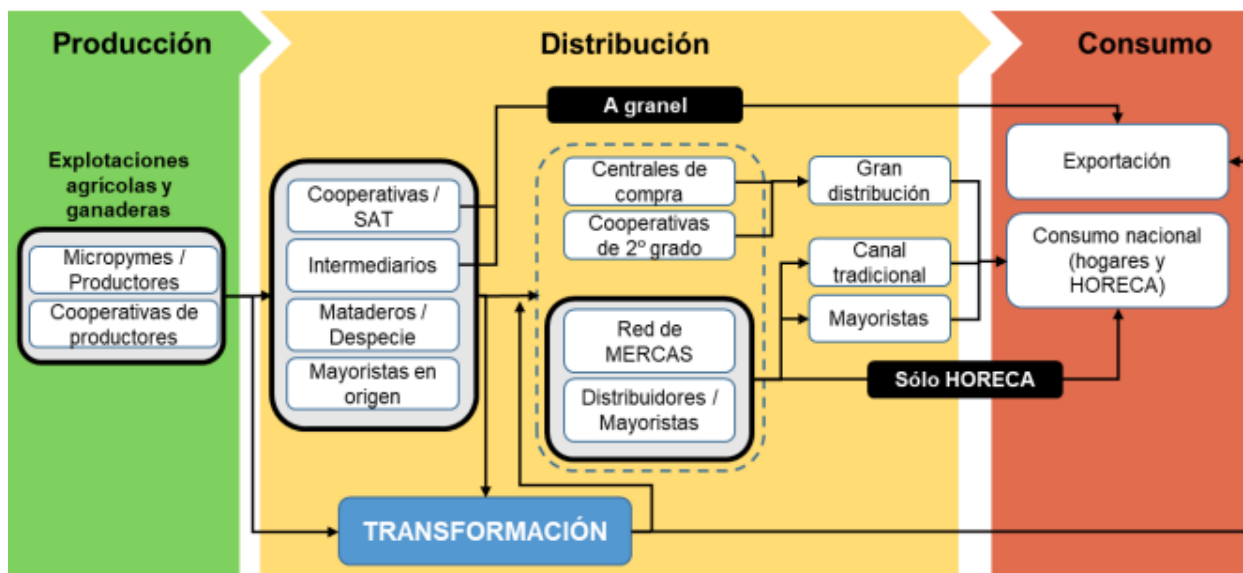


Figura 1: Cadena de valor tradicional del sector agroalimentario español. MAPAMA. (2017).

En Castilla y León, el sector agrícola está experimentando una transformación significativa debido a la modernización y la competencia global. Aunque el carácter extensivo y la fragmentación de la propiedad agraria tradicional persisten, las nuevas explotaciones son cada vez más grandes, tecnificadas y competitivas, impulsadas por el mercado global. A pesar de los esfuerzos por revitalizar el campo, se observa una reducción tanto en el número de explotaciones agrarias como en el empleo agrario, mientras que la potencia técnica y el tamaño económico de las explotaciones agrarias se están consolidando. Esta tendencia y la reducción del empleo refleja la transición hacia una agricultura más capitalista y empresarial, donde muchos agricultores a tiempo parcial y jubilados continúan recibiendo ayudas, contribuyendo a una discrepancia entre el número de perceptores de pagos y el de explotaciones funcionales⁵.

Para afrontar estos desafíos de manera efectiva y asegurar la supervivencia del sector agrícola en Castilla y León, resulta fundamental impulsar la modernización y la optimización de las explotaciones. Además, la eficiencia energética y la maximización de las producciones

⁵ Hernando. (2016).

agrícolas se han convertido en pilares indispensables para garantizar la viabilidad económica y ambiental de las operaciones del sector⁶.

Si en primer lugar ponemos el foco en la eficiencia energética, podemos observar cómo el sector agrícola está experimentando una evolución hacia sistemas más sostenibles al reducir su dependencia hacia los combustibles fósiles en todas las etapas de la actividad agrícola. Se incluyen medidas para suplir parte de las necesidades energéticas de las explotaciones, como la adopción de maquinaria más eficiente, el riego por goteo, implementaciones de variadores para arranques progresivos, la creación de canales de agua cercanos y la incorporación de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica⁷.

Por otro lado, cuando buscamos optimizar las explotaciones agrícolas podemos centrarnos en aumentar el volumen de nuestras producciones o en reducir costes. Actualmente, son prácticas agronómicas avanzadas, como la agricultura de precisión, drones o el uso selectivo de fertilizantes y pesticidas, las que permiten llevar a cabo ambos objetivos, mejorando los rendimientos económicos. En la última década, se observa una tendencia ascendente tanto por número de acuerdos como por inversión total en el sector agroalimentario o “AgTech” en Estados Unidos⁸. Adicionalmente, la introducción de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) y la tecnología blockchain, junto con el análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data), está marcando un cambio de paradigma en el sector cada vez más tecnificado. Ejemplos de esto incluyen programas como MyJohnDeere o Sativum, que facilitan el mapeo, el seguimiento cronológico y la gestión de terrenos agrícolas.⁹

Con el objetivo de maximizar la productividad, rentabilidad y sostenibilidad de la explotación agrícola en cuestión, se propone una consultoría técnica y económica que se adapte a sus necesidades específicas, aprovechando las herramientas mencionadas anteriormente.

⁶ Lamo de Espinosa y Michels de Champourcin. (2008).

⁷ Alejos Lop. (2016).

⁸ Morrás Lorenzo. (2018).

⁹ Ciruela-Lorenzo. (2020).

Descripción detallada de la finca

Situada a siete kilómetros al noroeste del municipio de Mayorga de Campos, provincia de Valladolid, la finca se caracteriza por su terreno predominantemente pedregoso y limoso. Un terreno ligero con baja capacidad de retención de agua, alta permeabilidad y tiempo de tempero, y buena aireación y drenaje. Esta explotación cuenta con aproximadamente 800 hectáreas, con una distribución de 290 ha hectáreas de regadío y 510 hectáreas de secano, dedicadas al cultivo de trigo blando, cebada, cártamo, remolacha, girasol, pastos permanentes o barbecho. Esta superficie en su totalidad es explotada por sus propietarios, menos una cierta cantidad de hectáreas arrendadas a la empresa “Campos Amarillos” para el cultivo del cártamo. Independientemente de la producción de cártamo obtenida abonan una cantidad de 800 € por hectárea en regadío y 200 € por hectárea en secano. También se les repercute el coste del riego, ponen la mano de obra y la maquinaria para la cosecha.

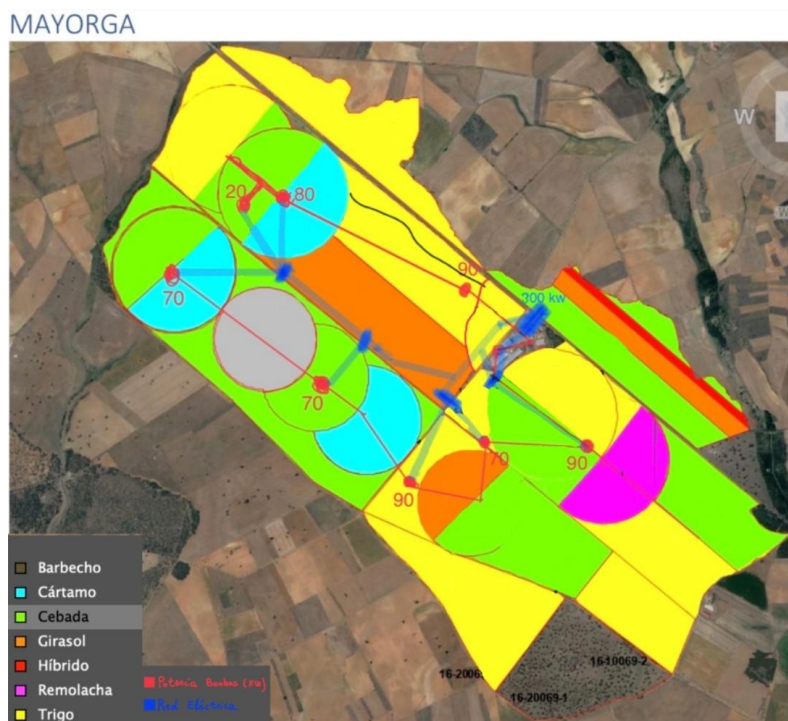


Figura 2: Plan de cultivos, campaña 2023. MAPAMA. (2017).

Puesto que la explotación no se encuentra cerca de masas de agua, se emplean 3 bombas de 90 CV, 3 bombas de 70 CV, una bomba de 80 CV, una bomba de 20 CV y una de 10 CV para extraer este recurso a una profundidad de 160 metros. Éstos 9 pozos cuentan con unas

concesiones de riego otorgadas según la Ley de Aguas de 1985, por lo que anualmente la Confederación Hidrográfica del Duero comprueba mediante los caudalímetros instalados en cada pozo que no se han extraído más de 240000 metros cúbicos de agua por perforación. Esta restricción no limita en absoluto el desempeño de la actividad agrícola al ser una cifra muy superior a las necesidades hídricas anuales de cualquier cultivo.

La extracción de agua conlleva un gran esfuerzo energético y supone uno de los mayores costes de la explotación. Con el objetivo de reducir este esfuerzo financiero, la explotación cuenta con una serie de placas solares, que, hibridadas con la red, suministran una potencia aproximada de 212 KW. Concretamente se tratan de 468 placas solares dispuestas en 9 ejes fijos horizontales (8 seguidores x 54 placas y 1 seguidor x 36 placas) con 144 células fotovoltaicas, una potencia máxima de 445W y unas dimensiones de 2120mm x 1052 mm x 40 mm por panel. Esto nos permite abastecer simultáneamente como máximo a dos bombas de 90 CV cuando la radiación solar incidente es adecuada para su óptimo funcionamiento, generando una media anual de 236,88 MWh que supone un ratio de autoconsumo entorno al 39% de toda la electricidad empleada para el riego de cultivos y proporcionando anualmente 336625.138 m³ de agua. Estas dos bombas, al estar hibridadas con la red, se estima que toman de la red el 10% de la electricidad que consumen. Nótese como este volumen de agua será altamente relevante para este trabajo, puesto que define nuestra disponibilidad de agua para regar cultivos de regadío con energía solar. Estos datos quedan registrados en el software INGECON SUNMonitor y son revisados al final de cada ejercicio. Como ejemplo, éstos fueron los datos archivados en 2023:

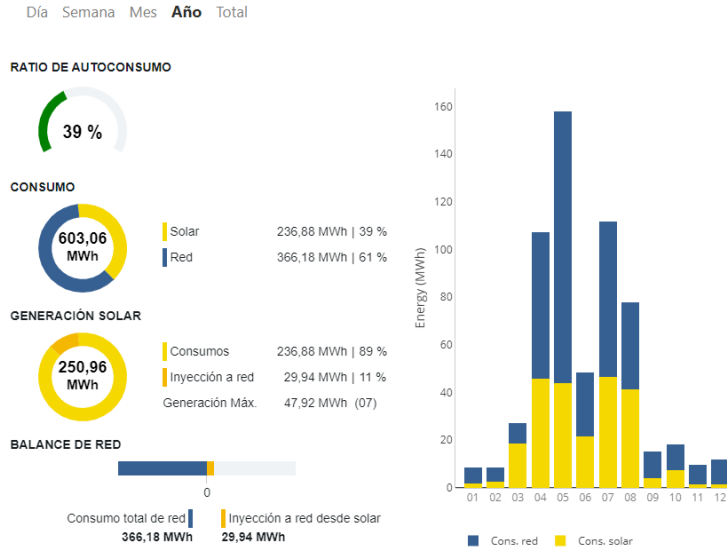


Figura 3: Consumo eléctrico durante la campaña de 2023. INGECON SUNMonitor. (2023).

Analizamos la energía solar de onda corta incidente diario total que llega a la superficie de la tierra en una área determinada, considerando las fluctuaciones estacionales en la duración del día, la elevación del sol sobre el horizonte y la absorción de las nubes y otros elementos atmosféricos. La radiación de onda corta abarca tanto la luz visible como la radiación ultravioleta. La energía solar de onda corta incidente promedio diaria experimenta variaciones estacionales significativas a lo largo del año.

En Mayorga de campos, el período más resplandeciente del año abarca 3,2 meses, desde el 12 de mayo hasta el 20 de agosto, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado superior a 6,8 kWh. El mes más resplandeciente en Mayorga es julio, con un promedio de 7,9 kWh. En el extremo opuesto, el período más oscuro del año se extiende por 3,6 meses, desde el 26 de octubre hasta el 14 de febrero, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado inferior a 2,9 kWh. El mes más oscuro en Mayorga es diciembre, con un promedio de 1,7 kWh.

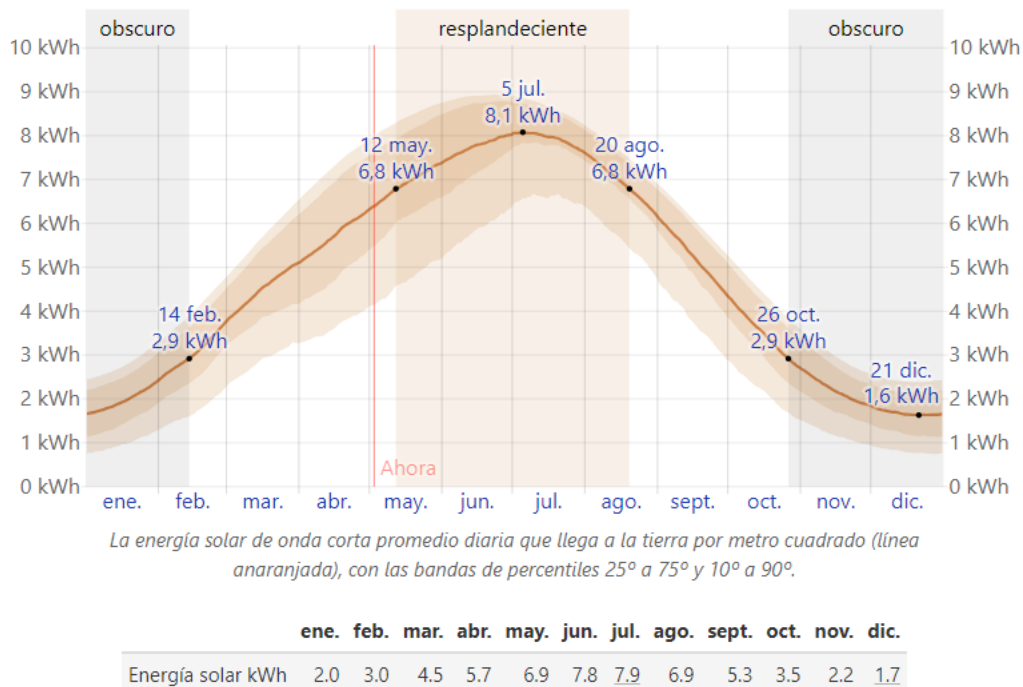


Figura 4: Energía solar de onda corta incidente diario promedio en Mayorga. NASA. (2023).

Por otro lado, se emplean 9 pivots de riego, con capacidad para cubrir una superficie aproximada de 30 hectáreas por pivot. Al tratarse de maquinaria con una antigüedad cercana a los 60 años, se requiere una continua inversión en su mantenimiento.

Esta explotación se encuentra a una altitud de 774 m y cuenta con una climatología categorizada como continental templada. Esto significa que experimenta veranos calurosos e inviernos fríos, con una marcada variación estacional en las temperaturas y en los patrones de precipitación. Haciendo una descripción general de las condiciones climáticas en un año medio, describimos cada una de las 4 estaciones de la siguiente manera: ¹⁰

Verano (junio a agosto): Durante los meses de verano, Mayorga de Campos experimenta temperaturas altas y días soleados. Las temperaturas medias diurnas suelen oscilar entre los 25°C y los 28°C, aunque en algunos días pueden superar los 33°C. Las noches suelen ser más frescas, con temperaturas que rondan los 11°C a 18°C. La precipitación es escasa durante

¹⁰ Cedar Lake Ventures. (2023).

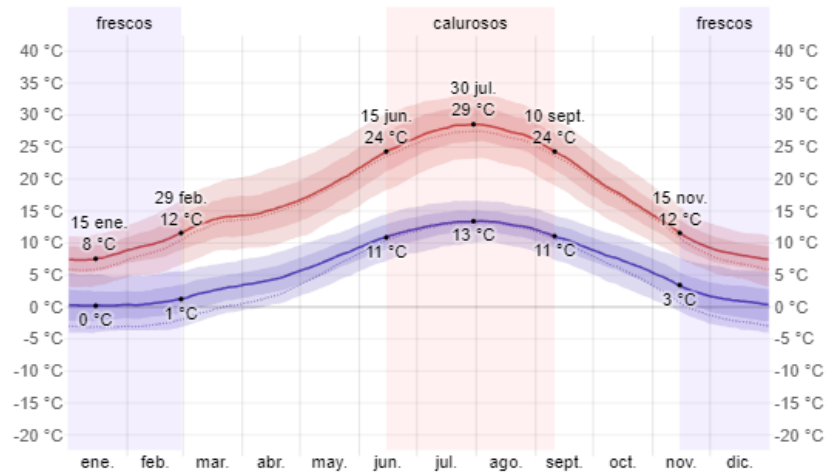
esta temporada, con lluvias esporádicas y tormentas eléctricas ocasionales. En promedio, la precipitación durante el verano se sitúa alrededor de los 14.53 mm por mes.

Otoño (septiembre a noviembre): En otoño, las temperaturas comienzan a descender gradualmente. Las máximas diurnas varían entre los 12°C y los 17°C, mientras que las mínimas nocturnas pueden caer por debajo de los 7°C. La precipitación aumenta ligeramente, con lluvias más frecuentes y prolongadas en comparación con el verano. Durante estos meses, la precipitación promedio mensual oscila alrededor de los 34.26 mm.

Invierno (diciembre a febrero): Los inviernos en Mayorga de Campos son fríos, con temperaturas diurnas que rondan los 4°C a 8°C y mínimas nocturnas que pueden descender por debajo de 0°C, especialmente durante las noches más despejadas. Es común la formación de heladas y neblinas matinales. La precipitación en forma de lluvia es moderada, pero también pueden producirse nevadas ocasionales. Durante el invierno, la precipitación mensual promedio es de aproximadamente 27.3 mm.

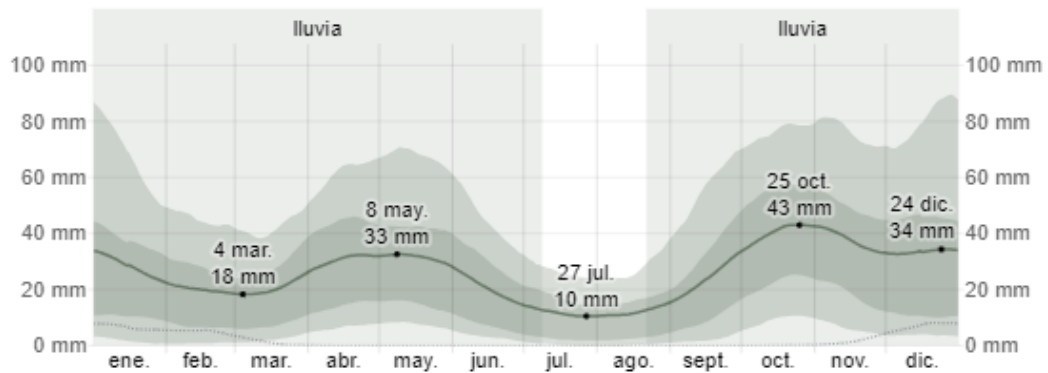
Primavera (marzo a mayo): En primavera, las temperaturas comienzan a aumentar gradualmente. Las máximas diurnas oscilan entre los 15°C y los 24°C, mientras que las mínimas nocturnas suelen estar entre 4°C y 13°C. La primavera es una temporada de transición, con un aumento en la frecuencia de las lluvias y la posibilidad de algunas tormentas. Durante estos meses, la precipitación promedio mensual es de alrededor de 27.6 mm.

Temperatura máxima y mínima promedio en Mayorga

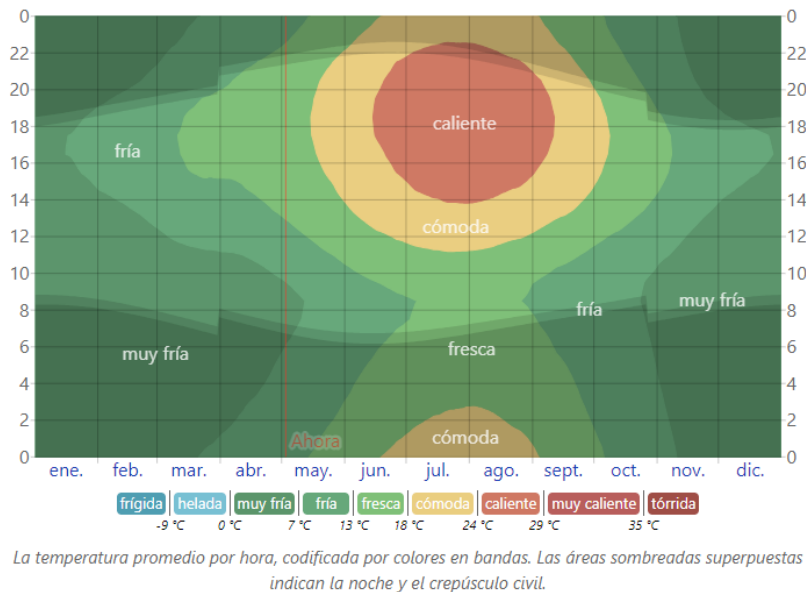


Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sept.	oct.	nov.	dic.
Máxima	8 °C	10 °C	13 °C	15 °C	19 °C	24 °C	28 °C	28 °C	23 °C	17 °C	12 °C	8 °C
Temp.	4 °C	5 °C	8 °C	10 °C	13 °C	18 °C	21 °C	20 °C	17 °C	12 °C	7 °C	4 °C
Mínima	0 °C	1 °C	2 °C	4 °C	7 °C	11 °C	13 °C	13 °C	11 °C	7 °C	3 °C	1 °C

Promedio mensual de lluvia en Mayorga



	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sept.	oct.	nov.	dic.
Lluvia	28,6mm	20,0mm	19,5mm	31,3mm	32,0mm	20,6mm	11,5mm	11,5mm	23,3mm	41,5mm	38,0mm	33,3mm



Figuras 5, 6 y 7: Condiciones climatológicas de un año promedio en Mayorga de campos. NASA. (2023).

La explotación cuenta con una infraestructura de riego compuesta por 8 pivots, los cuales requieren una continua inversión en mantenimiento debido a su antigüedad. Además, para el suministro de agua se emplean bombas que extraen agua a una profundidad de alrededor de 160 metros, lo que conlleva un importante esfuerzo energético. Para mitigar este costo, la explotación cuenta con placas solares que, híbridadas con la red eléctrica, suministran una potencia significativa, reduciendo así la factura eléctrica y mejorando la eficiencia energética.

Justificación del proyecto.

Dada la complejidad y los desafíos que enfrenta un sector agrícola español, especialmente en regiones como Mayorga de Campos, marcado por la escasez de mano de obra, la disminución de tierras fértiles, el cambio climático, la escasez de agua y la falta de competitividad en un mercado globalizado, surge la iniciativa de implementar mejoras significativas.

Esta zona se caracteriza por una agricultura predominantemente cerealista, con una dependencia notoria de recursos hídricos y energéticos para mantener las operaciones agrícolas. Es por ello, que en este proyecto trato de ofrecer soluciones a los aspectos que pueda abarcar como técnico industrial. Busco mejorar la eficiencia energética y optimizar los

rendimientos en nuestra explotación agrícola, a través de la planificación de nuestros cultivos y valorar el alto consumo energético de la extracción de agua para riego.

Trato de juntar las necesidades de la explotación con un modelo que nos permita dirigir la inversión hacia mayores retornos. Con esa máxima, este proyecto se enfoca en la implementación del modelo matemático de Palacios¹¹, reconocido por su flexibilidad y fácil aplicación, en un software como Matlab que nos permite emplear la programación lineal. Obtendremos el plan de cultivos óptimo que nos hubiera permitido maximizar nuestros rendimientos económicos en las últimas campañas. Lo que servirá como base para poder proporcionar al propietario la mejor hoja de ruta posible en cuanto a rentabilidad respecta de cara a futuras campañas. De tal forma que con este proyecto logremos respaldar y mejorar su toma de decisiones.

Finalmente, en el plano personal, con este trabajo trato de contribuir y apoyar en la gestión y administración de la explotación agrícola familiar en la que crecí. Con el paso de los años, he observado el declive de la explotación y de su rentabilidad en un sector cada vez más complejo a la par que competitivo. Desarrollando este proyecto, pretendo aprovechar la tecnología disponible para revitalizar el negocio y maximizar su potencial económico a largo plazo.

Objetivos generales y específicos.

En resumen, este proyecto tiene como objetivo principal maximizar la productividad y rentabilidad de la explotación multicultivo en Mayorga de Campos, a través de la optimización de los cultivos y el uso eficiente de los recursos, incluyendo la energía y el agua. Además, se buscará evaluar el impacto económico y ambiental del empleo de fuentes de energía renovable, con el fin de proporcionar información relevante para la toma de decisiones del propietario y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la explotación agrícola.

¹¹ (Palacios & García, 1986)

El propósito principal de este proyecto es desarrollar un plan de mejora para una explotación agrícola multicultivo en Mayorga de Campos. Me enfocaré en maximizar la rentabilidad de esta explotación, para lo cual realizaré un detallado análisis de los cultivos actuales y de su desempeño, identificando áreas susceptibles de mejora. Las campañas agrícolas más recientes sentarán las bases para poder estudiar los precios, producciones, costes, rentabilidades, necesidades hídricas y consumos eléctricos de cada cultivo. Utilizaré un modelo matemático optimizado por medio de programación lineal en Matlab para analizar los posibles escenarios que influyen positivamente en los rendimientos agrícolas. Este modelo me permitirá determinar si existen formas de reorganizar la disposición de los cultivos en la explotación y evaluar cómo el uso de fuentes de energía renovable contribuye a los beneficios netos. Utilizaré los resultados obtenidos para brindar información y orientación que mejoren la toma de decisiones por parte del propietario.

Adicionalmente, aprovecharé para optimizar el riego agrícola, examinando su distribución en la explotación. Utilizaré nuevamente el modelo de programación lineal para comprender cómo los beneficios netos de la explotación se ven afectados por los cambios en la disponibilidad de agua, diferenciando claramente entre el riego realizado mediante fuentes de energía renovable y aquel realizado mediante energía tomada de la red eléctrica.

Por otro lado, realizaré una evaluación de riesgos como parte del análisis económico del proyecto. Al tratarse de un negocio a la intemperie, donde las producciones agrícolas están fuertemente ligadas a las fluctuaciones de las impredecibles condiciones meteorológicas y los rendimientos económicos dependen en gran medida de los variantes precios de mercado, quisiera convertir este modelo de incertidumbre en un modelo de riesgo. Analizaré la volatilidad del precio y la fluctuación de las producciones de cada cultivo al ser dos factores a tener muy en cuenta en nuestro plan de cultivos.

Este proyecto está alineado principalmente con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

ODS 2: Hambre Cero:

Esto se debe a que busca aumentar la productividad agrícola de manera sostenible, lo que contribuirá a satisfacer la creciente demanda de alimentos y garantizar el acceso a estos para las futuras generaciones. De hecho, la optimización de los rendimientos agrícolas y la mejora en la eficiencia energética fomentan este incremento en producción. Este componente de sostenibilidad es imprescindible cuando pensamos en garantizar el acceso alimentario de futuras generaciones.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables:

Dado que promuevo prácticas agrícolas eficientes, abordando el alto consumo energético necesario en la extracción de agua para riego, con este proyecto fomento una producción y un consumo responsables. Además, puesto que proporciono un asesoramiento técnico y económico personalizado, promuevo una producción agrícola sostenible y concienciada con el medio ambiente.

En conclusión, estas son las bases en las que se asienta nuestro proyecto. Las circunstancias descritas proporcionan la base para entender la importancia de optimizar la producción y sostenibilidad en la agricultura moderna. Además, los desafíos expuestos son relevantes para este trabajo ya que justifican la necesidad de implementar un plan de mejora en la explotación agrícola.

2. Descripción de las tecnologías y estado de la técnica:

En este capítulo se abordan ciertas tecnologías, metodologías y modelos matemáticos, consideradas de interés para nuestro proyecto al haber sido utilizadas en la optimización de la rentabilidad agrícola y la gestión de los recursos en diversas explotaciones agrícolas. Este análisis se enmarca en el objetivo global del trabajo, que busca desarrollar un plan de mejora integral para una explotación multicultivo en Mayorga de Campos, optimizando tanto sus recursos hídricos como energéticos, y maximizando su rentabilidad económica. Por lo tanto, a continuación, presentaré estudios previos en el sector agrícola divididos en tres grupos: Optimización de la rentabilidad agrícola, Teoría de porfolios y análisis de riesgos, y Otras vías de mejora.

Optimización de la rentabilidad agrícola.

En primer lugar, es importante considerar el principal desafío en la creación de modelos matemáticos para incrementar los rendimientos agrícolas: la inmensa cantidad de factores que afectan a la producción agrícola¹².

Los enfoques tradicionales de investigación provenientes de otras disciplinas han intentado abordar cuestiones biológicas y económicas relacionadas con la agricultura, pero no han sido completamente exitosos debido a la complejidad específica de este sector. Sin embargo, en las últimas dos décadas, el análisis cuantitativo ha ganado relevancia, y las matemáticas se han convertido en una herramienta valiosa para formular hipótesis biológicas¹³.

El beneficio económico neto que una explotación agrícola puede obtener en un periodo genérico se puede expresar de la siguiente manera:¹⁴

$$Ec1. \quad (N = (I_1 - C_1) * S_1 + (I_2 - C_2) * S_2 + \dots + (I_n - C_n) * S_n)$$

¹² González Sánchez. (2007).

¹³ Gálvez. (2010).

¹⁴ Palacios & García. (1986).

Tomando como variables:

-**N** refleja el Beneficio económico neto en unidad monetaria (€)

-**I_i** representa el Ingreso Bruto por hectárea (ha) del cultivo *i*, obtenido al multiplicar el rendimiento por unidad de superficie (ton/ha) del cultivo *i* por el precio unitario del producto cosechado (€/ha).

-**C_i** es el Costo de Producción por unidad de superficie del cultivo *i* (€/ha).

-**S_i** indica la Superficie (área) destinada al cultivo *i* (ha).

Esta ecuación será la base del modelo de programación lineal que propondremos posteriormente en este proyecto.

Además, se somete esta expresión a una serie de restricciones, como podría ser la disponibilidad mensual de agua extraída con energía renovable o extraída de la red, o la superficie disponible máxima¹⁵,

Ec2.

$$\left(\sum_i^n S_i \leq S_T \right)$$

siendo **S_T** la superficie total disponible para sembrar los *n* cultivos.

Ec3.

$$S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n \leq V_F$$

Ec4.

$$S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n \leq V_R$$

-**a_i** es el requerimiento de riego del cultivo *i* en el mes número *m*.

¹⁵ Palacios & García. (1986).

$-V_R$ es el volumen de agua disponible de fuentes renovables en el mes j .

$-V_F$ es el volumen de agua disponible de fuentes fósiles en el mes j .

También se muestra como los requerimientos mensuales de riego por cultivo para cada unidad de riego se determinan con base en los volúmenes servidos, en promedio en los últimos cinco años que toma la granja para regar los cultivos, como determina esta expresión¹⁶:

$$Ec5. \quad R_{ij} = \frac{V_{ij}}{\frac{S_i}{E_j}}$$

Tomando como variables:

$-R_{ij}$ es el requerimiento de agua mensual del cultivo i en el mes j .

$-V_{ij}$ es el volumen suministrado al cultivo i en el mes j , en m^3 .

$-E_j$ es la eficiencia de conducción de la unidad de riego

$-S_i$ es la superficie regada del cultivo i en el ciclo agrícola en ha. Del cultivo i en el mes j .

Añadir esta variable nos permitirá la utilización de un modelo de programación lineal con un enfoque analítico, cuyo objetivo sea definir el patrón de cultivos para obtener el beneficio neto de los cultivos, bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua¹⁷.

Posteriormente, en 2011, se desarrolló una herramienta de toma de decisiones para pequeños y medianos productores de patata, destinada a la planificación de cultivos. Utilizando la programación lineal, se pudieron realizar predicciones sobre el precio futuro del cultivo y optimizar la gestión agrícola. Se identificó una falta de herramientas para la gestión empresarial y la asignación de recursos en el sector agrícola. Esta herramienta tiene como

¹⁶ Palacios-Vélez. (1989).

¹⁷ Ortega-Gaucin. (2009).

objetivo mejorar el rendimiento de los productores proporcionando acceso a información que facilite la toma de decisiones efectivas, incrementando la utilidad por hectárea tras dos ciclos agrícolas¹⁸.

Un año después, se desarrolló un modelo matemático basado en la metodología de enteros mixtos lineales, utilizando algoritmos precisos o aproximados como el método de Ramificación y Acotamiento (B&B). Este modelo busca encontrar la combinación óptima de cultivos en un sistema de irrigación, considerando múltiples variables como el clima, tipo de cultivo, disponibilidad de tierra, agua, semillas y condiciones ambientales. El modelo se divide en dos etapas: la primera, centrada en la planificación de la producción, determina la superficie y el patrón ideal de cultivos para asegurar el mejor rendimiento económico con los recursos disponibles; la segunda, se enfoca en el manejo eficiente del agua, optimizando su uso durante los unos turnos de irrigación que garanticen unos niveles hídricos adecuados para obtener un desarrollo óptimo. Niveles hídricos adecuados para todos los cultivos durante los turnos de irrigación, garantizando su desarrollo óptimo¹⁹. Ambos enfoques se implementarán en nuestro proyecto, utilizando modelos de programación lineal.

En 2016, se desarrolló un programa de producción de azúcar utilizando programación lineal con el software TORA, destinado a mejorar la productividad. Esta investigación, de naturaleza cuantitativa, se basa en el análisis de datos históricos de producción de azúcar mediante métodos matemáticos. Se identificó que la principal problemática era la falta de una adecuada planificación y programación de la producción, y se buscó optimizar variables como la producción por turno y mes, los requerimientos de materia prima, mano de obra y costos asociados²⁰.

Se propuso, en 2021, un modelo que tiene como objetivo optimizar la rentabilidad agrícola de los cultivos de papa, cebollas y zanahoria. Se aplicó la programación lineal para maximizar la utilidad bruta al distribuir mejor los recursos, pero a diferencia de los enfoques anteriores se integraron restricciones de área, mercado y capital anual, así como la

¹⁸ Mosquera. (2011).

¹⁹ Cid García. (2012).

²⁰ Monja & Sedan. (2016).

consideración de la estacionalidad de los precios y la rotación de cultivos. Este modelo cuenta con dos escenarios de optimización: uno con restricciones de mercado que obliga a mantener una proporción específica de cultivos durante todo el año, y otro sin dichas restricciones, permitiendo una siembra más concentrada en los meses de mayor rentabilidad. Se destaca la importancia de las dinámicas de precios y la planificación estratégica a largo plazo para la producción agrícola²¹.

Finalmente, en 2023, se implementó un modelo de regresión lineal para explicar los resultados de la producción de cultivos como la soja, analizando costos de personal y agroquímicos en las fases de presembrado y postsembrado de la explotación agrícola²². La incorporación de tecnologías como IA, Blockchain y Big Data está revolucionando la agricultura, permitiendo una gestión más precisa y eficiente de los recursos y mejorando la trazabilidad y la transparencia en la cadena de suministro agrícola.²³

Teoría de portafolios y análisis de riesgos:

La Teoría de Portafolios, desarrollada por Harry Markowitz en 1952, es un pilar fundamental en el ámbito de la gestión financiera. Esta teoría revolucionó la forma en que los inversores abordan la construcción y gestión de sus carteras, introduciendo conceptos clave como la diversificación, el modelo de varianza media y la frontera eficiente. La teoría se basa en la idea de que, mediante la diversificación, los inversores pueden maximizar el retorno esperado de una cartera para un nivel dado de riesgo, o minimizar el riesgo para un retorno esperado determinado.

La diversificación es uno de los pilares fundamentales de la Teoría de Portafolios. La idea central es que, al combinar diferentes activos en una cartera, se puede reducir el riesgo no sistemático, es decir, aquel riesgo que es específico de una empresa o sector y que puede ser mitigado a través de la diversificación. Esto se debe a que los activos no están perfectamente

²¹ Barboza-Navarro. (2021).

²² de Castro. (2023).

²³ Ciruela-Lorenzo. (2020).

correlacionados; mientras algunos activos pueden disminuir su valor, otros pueden mantenerlo o aumentarlo, compensando así las fluctuaciones individuales

La frontera eficiente es otro concepto crucial en la Teoría de Portafolios. Representa todas las combinaciones posibles de activos que ofrecen el máximo retorno esperado para cada nivel de riesgo. Inversiones ubicadas en la frontera eficiente son consideradas óptimas porque ninguna otra combinación de activos puede ofrecer un mayor retorno esperado para el mismo nivel de riesgo. Este modelo de varianza media ayuda a los inversores a determinar la combinación de activos que minimiza la varianza de la cartera para un retorno esperado o maximiza el retorno para una varianza dada.

A estos tres conceptos anteriores se le suma el “Modelo de Varianza Media”, que utiliza la varianza (o desviación estándar) como medida de riesgo y el retorno esperado como medida de beneficio. El objetivo es encontrar la combinación de activos que minimice la varianza de la cartera para un retorno esperado dado, o viceversa, que maximice el retorno para una varianza dada.

El análisis de riesgos en la gestión de portafolios se centra en identificar, medir y gestionar los riesgos a los que se enfrenta una cartera. Las principales medidas de riesgo incluyen la desviación estándar, el Value at Risk (VaR) y el análisis de escenarios. Estas herramientas permiten a los gestores de portafolios evaluar la volatilidad y las posibles pérdidas bajo diferentes condiciones de mercado. El VaR, por ejemplo, estima la pérdida máxima que una cartera podría sufrir en un período dado con un nivel de confianza específico. Además, el uso de simulaciones de Monte Carlo y análisis de sensibilidad son técnicas comunes para evaluar el impacto potencial de los riesgos en los objetivos del portafolio y tomar decisiones informadas para mitigar o eliminar esos riesgos

Inicialmente en 2001, encontramos un estudio que analiza cómo los agricultores seleccionan alternativas productivas bajo riesgo utilizando la teoría de portafolios y el análisis de varianza esperada (E-V). Basado en información económica histórica de rotaciones de secano en la explotación seleccionada para el estudio, se evaluaron portafolios económicos óptimos según su margen neto real y desviación estándar. Se aplicaron conceptos de la teoría de selección de portafolios para ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas en un contexto

de riesgo, considerando diferentes niveles de aversión al riesgo y tamaños de predio. Los portafolios catalogados como óptimos incluían rotaciones como trigo-avena y trigo-praderas, ajustándose según el nivel de aversión al riesgo y la superficie del predio, demostrando la viabilidad de seleccionar combinaciones económicamente estables²⁴.

Posteriormente, en 2014, se utiliza la teoría de portafolios para mejorar la estabilidad y rentabilidad de las inversiones agrícolas mediante la diversificación. El estudio empleó la programación lineal y simulaciones Monte Carlo para identificar combinaciones óptimas de actividades que minimizan el riesgo y maximizan la rentabilidad. Además, el foco se trasladó a buscar la optimización de rotaciones de cultivos bajo condiciones de secano en un fideicomiso agropecuario, incorporando actividades adicionales como el engorde bovino y la agroindustrialización. La inclusión del engorde bovino permitió a los productores diversificar sus fuentes de ingresos al integrar la cría y engorde de ganado en sus operaciones, lo que redujo la dependencia exclusiva de los cultivos agrícolas y distribuyó mejor el riesgo asociado a las fluctuaciones del mercado y a las condiciones climáticas adversas. La agroindustrialización, por su parte, añadió valor a los productos primarios al procesarlos y convertirlos en bienes de mayor valor agregado, como productos lácteos o conservas, lo que aumenta la rentabilidad y ofrece mayores márgenes de beneficio. Estos enfoques no solo distribuyen mejor el riesgo, sino que también aprovechan las economías de escala, mejorando la eficiencia operativa del fideicomiso²⁵.

Finalmente, en 2021, se explicó como la teoría de portafolios se aplica en la diversificación de cultivos hortícolas para optimizar la relación riesgo-rendimiento. Utilizando el modelo de Markowitz y los datos históricos de las campañas de 1980 a 2018, se evaluaron portafolios óptimos en términos de margen neto y desviación estándar. A diferencia del estudio previo, en este artículo destaca la dificultad de obtener porcentajes positivos para todos los cultivos debido a la fuerte correlación entre los rendimientos. Sin embargo, al limitar la cantidad de cultivos basándose en una matriz de correlación débil, se identificó una región donde todos los cultivos tienen participaciones positivas, optimizando la eficiencia y reduciendo el riesgo. Este enfoque subraya la necesidad de adaptar la teoría de portafolios a contextos agrícolas

²⁴ González. (2002).

²⁵ Álvarez. (2014).

específicos, enfrentando desafíos únicos en la diversificación de cultivos y la gestión de riesgos.

Otras vías de mejora:

Adicionalmente otros autores han desarrollado otras alternativas de mejora. Serán mencionadas en este apartado de forma divulgativa, pero no sentarán las bases de este proyecto.

Optimización de la Producción Agrícola

En este apartado, los autores se centran en incorporar ciertas modificaciones de las labores propias de cada campaña agrícola, buscando un aumento de las producciones. Es por ello que se centran en ciertas fases de la campaña agrícola como puede ser la siembra, abonado, fertilización o recolección. Podemos separar discernir entre aquellos autores que emplean herramientas propias de la biotecnología y la innovación en la mecánica.

Por un lado, encontramos autores que emplean la biotecnología para mejorar las producciones obtenidas. Se aborda el problema de los elevados costos de los fertilizantes en la producción agrícola y la cantidad óptima de cultivos a sembrar. Los fertilizantes se seleccionan según su contenido nutricional y precios, considerando información como análisis del suelo, tipo de cultivo, rendimiento esperado y ubicación geográfica. Posteriormente, se calculan las cantidades necesarias de nutrientes y se analiza la mezcla óptima de fertilizantes y sus costos²⁶. Además, estos modelos también se utilizan para prevenir la sobreutilización del terreno y mejorar la eficiencia en la aplicación de nitrógeno y agua para el riego, evitando así el despilfarro de recursos²⁷.

Por otro lado, otros autores se centran en la incorporación de nueva maquinaria agrícola, encontramos proyectos que apuestan por una agricultura tecnificada. La agricultura de precisión, fundamentada en tecnologías de información y geolocalización como GPS y sistemas de información geográfica (GIS), permite ajustar el uso de insumos agrícolas a la

²⁶ Yong. (2018).

²⁷ Campaña. (2011).

variabilidad del terreno. Maquinaria avanzada como sembradoras, abonadoras y pulverizadores equipados con sistemas de control y ajuste preciso, facilita una distribución localizada y variable de insumos según las características específicas de cada área. Esto conlleva una reducción de costos y una gestión agrícola más respetuosa con el medio ambiente, marcando el inicio de una revolución en la gestión de los recursos naturales²⁸.

En conclusión, las innovaciones en la maquinaria y técnicas agrícolas, a través de la biotecnología y maquinaria avanzada, han aumentado significativamente la producción agrícola.

Eficiencia Energética en el Riego Agrícola

La eficiencia energética en el riego agrícola también ha sido un área de enfoque crucial. En 1989, se desarrollaron modelos matemáticos para calcular las demandas mensuales de agua basándose en volúmenes históricos. Estos modelos proporcionaron una base sólida para la planificación eficiente del riego, ayudando a reducir el consumo de agua y energía.

Posteriormente, en 2009, se introdujeron modelos analíticos para optimizar el almacenamiento de agua y maximizar los beneficios bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua. Estos modelos consideraban factores como el clima y las propiedades del suelo, proporcionando una visión holística de la gestión del riego. En 2010, se desarrollaron modelos más complejos que incluían múltiples objetivos, como el costo y beneficio de los cultivos, y factores climáticos como la lluvia, la velocidad del viento y la temperatura. Estos modelos ayudaron a optimizar la eficiencia del riego y el uso de recursos hídricos en la agricultura.

En 2020, encontramos un sistema que utiliza paneles solares para generar la energía necesaria para operar las bombas de riego, eliminando la dependencia de fuentes de energía tradicionales y reduciendo emisiones de CO₂. La automatización del sistema permite ajustar el riego en función de las necesidades específicas del cultivo y las condiciones ambientales, maximizando la eficiencia del uso del agua. Además, el control preciso del riego contribuye

²⁸ Fernández-Quintanilla. (2002).

a una mejor dosificación de nutrientes, la reducción de la proliferación de maleza y la prevención de enfermedades.

Finalmente, en 2021, se presentan sistemas de riego presurizado, capaces de alcanzar eficiencias de riego superiores al 90% al minimizar pérdidas por evaporación y escorrentía. Además, la implementación de variadores de frecuencia en las bombas permite ajustar la velocidad según la demanda, optimizando el consumo energético y reduciendo las emisiones de CO₂. La sectorización y automatización del riego con sondas de presión aseguran una distribución uniforme del agua, y la selección técnica de las tuberías garantizan una operación eficiente.²⁹

La optimización de la producción agrícola y la eficiencia energética en el riego son esenciales para mejorar la sostenibilidad y rentabilidad de las explotaciones agrícolas. Puesto que profundizan en materias biológicas específicas o necesitan ciertas modificaciones en infraestructura, no serán el foco principal de este proyecto.

Conclusiones del estado de la técnica

En conclusión, a este segundo apartado, este capítulo ha presentado una visión exhaustiva de las tecnologías y metodologías actuales aplicadas en la optimización de la rentabilidad de las explotaciones agrícolas. La implementación de modelos matemáticos avanzados, como la programación lineal y la teoría de portafolios, junto con los análisis de los requerimientos de agua mensuales, proporcionan un marco robusto para mejorar la gestión agrícola de nuestra explotación y desarrollar un modelo funcional. Permitiendo no solo maximizar los beneficios económicos, sino que también promover una agricultura más sostenible y eficiente. Estableceremos la programación lineal como el eje principal para la elaboración de un modelo matemático que nos permita crear un plan óptimo de cultivos. Seguida por la Teoría de Portfolios, herramienta fundamental para la evaluación de riesgos y retornos. En los siguientes capítulos, se profundizará en la aplicación específica de estas técnicas en nuestra explotación, evaluando sus impactos y proponiendo mejoras concretas.

²⁹ Ascencios Templo. (2021).

3. Definición del modelo y planteamiento de hipótesis.

En este capítulo, hemos desarrollado un modelo matemático basado en la programación lineal para maximizar la rentabilidad de la explotación agrícola en Mayorga de Campos. Al establecer la función objetivo y las restricciones pertinentes nos aseguramos de que el modelo se ajuste a las condiciones específicas de la explotación. Este modelo nos proporcionará una herramienta fundamental para la creación de planes de mejora al desglosar la rentabilidad de nuestros cultivos y permitirá tomar decisiones informadas.

Además, hemos formulado las hipótesis clave que guiarán el desarrollo y la validación del modelo, así como los diferentes escenarios derivados de su implementación. Sentaremos los cimientos sobre los que se sostiene nuestro modelo y planificaremos el procedimiento pertinente para emplearlo en nuestro plan de cultivos, alineándonos con los objetivos de este proyecto. Este enfoque integral garantiza que nuestras estrategias sean efectivas y adaptadas a las necesidades específicas de la explotación agrícola.

Objetivos y especificaciones técnicas del modelo.

El principal objetivo del modelo propuesto consiste en elevar tanto la productividad como la rentabilidad de la explotación agrícola, buscando un manejo más eficiente de los limitados recursos disponibles. Para ello se analizará el beneficio neto por hectárea de cada cultivo, tanto de regadío como de secano. Se tendrán en cuenta dos factores restrictivos: la infraestructura de riego existente, conformada por la cantidad de pívots de riego existentes, y la disponibilidad de agua extraída mediante energía solar, que fue se empleará para regar los cultivos. El volumen de agua máximo que es legal extraer de los acuíferos subterráneos no se considerará un factor restrictivo al implicar un consumo hídrico inalcanzable para cualquier cultivo.

El modelo se enfocará especialmente en optimizar la utilización de la energía renovable, particularmente en aquellos cultivos donde abaratar el costoso riego agrícola resulte en un mayor retorno económico. Este enfoque estratégico permitirá no solo maximizar la

rentabilidad de la explotación agrícola, sino también contribuir a un desarrollo sostenible al promover el uso de fuentes de energía renovables.

Además, el modelo tiene como propósito identificar los cultivos más rentables tras simular que cultivos hubieran obtenido una mayor rentabilidad en las campañas anteriores y otorgarles un mayor protagonismo en los planes de cultivos de futuras campañas. Esto implica determinar cuáles son las combinaciones óptimas de cultivos y distribución del riego que generen los mayores beneficios económicos, gracias a ejecutar los datos históricos de campañas anteriores en nuestro modelo.

En resumen, el modelo se erige como una herramienta integral de gestión agrícola que persigue dos objetivos interrelacionados: incrementar la rentabilidad agrícola y promover la sostenibilidad ambiental a través del aprovechamiento eficiente de la energía solar.

Elaboración del modelo matemático y sus variables.

Siguiendo con la ecuación de Palacios³⁰ previamente explicada se busca emplear la programación lineal para optimizar una función objetivo que logre maximizar el beneficio económico neto de la explotación agrícola, utilizando de manera retrospectiva y analítica los rendimientos económicos obtenidos en campañas anteriores. Buscando obtener la combinación óptima de cultivos que nos hubiera permitido maximizar los beneficios económicos obtenidos en estas campañas previas, analizando detenidamente los cultivos resultantes e implementando este conocimiento en las próximas campañas. Optando por un modelo lineal, ampliamente utilizado en el mundo empresarial para resolver problemas de asignación de recursos, que de forma sencilla nos permite trabajar con un gran volumen de datos y extraer una visión global del plan de cultivos.

Estos modelos predicen un objetivo continuo basándose en relaciones lineales entre el objetivo y uno o más predictores. En nuestro caso, la función objetivo N es una combinación lineal de los ingresos y costos de los cultivos, ponderada por la superficie destinada a cada

³⁰ Palacios & García. (1986).

cultivo. Los predictores (B_i , C_i , S_i) son las variables que influyen directamente en el objetivo de maximizar el beneficio económico neto.

$$\text{Ec6.} \quad (N = (B_1 - C_1) * S_1 + (B_2 - C_2) * S_2 + \dots + (B_n - C_n) * S_n)$$

Tomando como variables:

-**N** refleja el Beneficio económico neto en unidad monetaria (€)

-**Bi** representa el Ingreso Bruto por hectárea (ha) del cultivo i , obtenido al multiplicar el rendimiento por unidad de superficie (ton/ha) del cultivo i por el precio unitario del producto cosechado (€/ha).

-**Ci** es el Costo de Producción por unidad de superficie del cultivo i (€/ha).

-**Si** indica la Superficie (área) destinada al cultivo i (ha).

En este modelo dividiremos la superficie cultivable de nuestra explotación en secano, regadío por red eléctrica y regadío por energía solar. Con las categorías de regadío por red eléctrica y regadío por energía solar, distinguiremos entre las superficies y cultivos de regadío que para extraer el agua de las perforaciones y dar presión a los pivots, emplearon electricidad generada con las placas solares o los que emplearon electricidad vertida por la red eléctrica. En la práctica, tendremos pivots y bombas cuyo variador está programado para iniciar su riego cuando la potencia eléctrica suministrada por las placas solares sea suficiente para su funcionamiento, y consumirán una reducida cantidad de electricidad de la red al estar híbridos en un ratio inferior al 10% con ésta.

Por otro lado, se establecen una serie de restricciones, en lo referente a la disponibilidad anual de agua que ha sido extraída de los pozos empleando la energía renovable de los paneles solares (336625.138 m³) y la superficie disponible para cultivos de regadío (290 ha) o de secano (510 ha). Obsérvese como de los 236,88 MWh que generan las placas solares anualmente, hemos calculado que nos proporcionan anualmente 336625.138 m³ de agua y,

por lo tanto, tendremos cultivos catalogados como cultivo i de riego suministrado con energía solar. Además, no es necesario incluir una restricción sobre el volumen de agua máximo extraíble en el total de la explotación, puesto que las amplias concesiones de nuestras perforaciones nos permiten extraer un total de 2160000 m³ de agua, un consumo hídrico inalcanzable para cualquier cultivo.

Para imponer estas restricciones se emplean tres inecuaciones lineales cuya variable dependiente es la superficie en hectáreas empleadas para cada cultivo.

$$Ec7. \quad \left(\sum_i^n S_i \leq S_R \right),$$

siendo S_R la superficie de riego disponible para sembrar los n cultivos.

$$Ec8. \quad \left(\sum_i^n S_i \leq S_S \right),$$

siendo S_S la superficie de secano disponible para sembrar los n cultivos.

$$Ec9. \quad (S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n \leq V_R),$$

siendo V_R el volumen de agua disponible anualmente procedente de fuentes renovables y a_i es el requerimiento de riego del cultivo i anualmente.

El presente modelo matemático se resuelve a través del “Método Simplex”, un método iterativo que parte de una solución básica factible dentro del conjunto de posibles soluciones y que busca una solución más óptima al punto de solución actual en los diferentes vértices formados por las restricciones establecidas, quedándose con el resultado más favorable a la función objetivo.

Planteamiento de hipótesis.

Al tratarse de sector agrícola y emplearse programación lineal para optimizar nuestra función objetivo, hemos establecido una serie de hipótesis como:

1. Hipótesis de consistencia en el impacto de la programación lineal en la rentabilidad global sin variaciones bruscas en las condiciones climatológicas: Se supone que la aplicación de técnicas de programación lineal para optimizar la asignación de recursos en los cultivos tiene un impacto consistente en la rentabilidad global de la explotación agrícola siendo sus resultados son extrapolables para futuras campañas agrícolas. Es por ello que tenemos en cuenta una cierta variación en las producciones agrícolas de cada uno de los cultivos, sin considerar el efecto de grandes fluctuaciones climatológicas.
2. Hipótesis de relación entre riego y rentabilidad: Se hipotetiza que existe una relación positiva entre la cantidad de agua aplicada para regar y la rentabilidad de los cultivos. Se cuenta con la premisa de que el suministro adecuado de agua es fundamental para el crecimiento y rendimiento de los cultivos.
3. Hipótesis de impacto de la energía solar en la rentabilidad: Se postula que el uso de energía solar para extraer agua de los pivots de riego contribuirá a reducir los costos operativos asociados con el riego, lo que resultará en una mayor rentabilidad para los cultivos que se benefician de esta tecnología.
4. Hipótesis de tener una infraestructura de riego y una generación solar con suficiente potencia para regar el mismo cultivo o cultivos con ciclos vegetativos simultáneos.

Planteamiento de diferentes escenarios.

1. Escenario actual

En este escenario se contempla la situación actual del sector agrícola español, específicamente de la explotación agrícola multicultivo ubicada en Mayorga de Campos. Se tienen en cuenta los desafíos que enfrenta el sector, como la disminución de tierras fértiles disponibles, el cambio climático, la escasez de recursos hídricos. Además, se destacan aspectos relevantes de la explotación como su variedad de cultivos, consumo energético, necesidades de riego, generación solar y extensión. Puesto que en los apartados de “Contexto y relevancia” y “Descripción detallada de la finca”, se profundizó y plasmó fielmente este escenario, no se entrará en más detalle en este apartado.

2. Escenario de implementación de mejoras

En este escenario explico cómo aplicaré los modelos propuestos y evaluaré la rentabilidad de los cultivos. Una vez obtenidos los resultados, analizaré cuales han sido los cultivos más rentables de cada campaña, observando los factores que más han influido en el alto rendimiento económico del mismo. Valoraré la sostenibilidad y constancia de dichos factores y si este cultivo reúne las cualidades necesarias para que su rentabilidad sea máxima en las futuras campañas, lo catalogaré como cultivo prioritario.

La necesidad de llevar a cabo una cierta rotación de cultivos para favorecer una mejor regeneración de los macronutrientes del suelo y evitar la acumulación de malas hierbas, hacen que se implemente un plan de mejora para futuras campañas que evite repetir anualmente el mismo cultivo en el mismo recinto y que imponga el barbecho en una misma parcela cada cinco años. Puesto que la superficie cultivable de nuestra explotación está dividida en secano, regadío por red eléctrica y regadío por energía solar, escogemos por separado los dos cultivos más rentables para cada tipología de terreno.

Además, se establece la limitación que como máximo haya dos variedades de superficie del mismo cultivo y una variedad en barbecho. Esto nos permitirá diversificar el riesgo asumido por campaña si las condiciones meteorológicas resultan especialmente adversas para un cultivo en particular. En adición, evitaremos que en la misma campaña haya más de una categoría de recinto en barbecho, permitiendo disponer de una cierta liquidez en todas las campañas para hacer frente a los costes fijos anuales de la explotación.

Con el objetivo de potenciar la diversificación en nuestro plan de cultivo, si tras ejecutar nuestro modelo matemático obtuvimos que la pareja de cultivos con mayor rentabilidad es la misma para dos o más categorías de superficie entonces desfasaremos estos cultivos por campañas de tal forma que como máximo haya dos tercios de la explotación del mismo cultivo. En el resto de los casos trataremos de ajustar un plan de cultivo con la mayor variedad posible de cultivos entre las diferentes categorías de superficie. Este sería un ejemplo de dos correctas implementaciones de las mejoras para dos posibles planes de mejora.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO CON MAYOR RENTABILIDAD	CULTIVO CON SEGUNDA MAYOR RENTABILIDAD	AÑO	SECANO	RED ELÉCTRICA	ENERGÍA SOLAR
2020	SECANO	CÁRTAMO	REMOLACHA	2024	CÁRTAMO	REMOLACHA	CÁRTAMO
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA	2025	REMOLACHA	CÁRTAMO	REMOLACHA
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA	2026	BARBECHO	REMOLACHA	CÁRTAMO
2021	SECANO	CÁRTAMO	REMOLACHA	2027	CÁRTAMO	BARBECHO	REMOLACHA
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA	2028	REMOLACHA	CÁRTAMO	BARBECHO
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA	2029	CÁRTAMO	REMOLACHA	CÁRTAMO
2022	SECANO	CÁRTAMO	REMOLACHA	2030	REMOLACHA	CÁRTAMO	REMOLACHA
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA	2031	BARBECHO	REMOLACHA	CÁRTAMO
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA	2032	CÁRTAMO	BARBECHO	REMOLACHA
2023	SECANO	CÁRTAMO	REMOLACHA	2033	REMOLACHA	CÁRTAMO	BARBECHO
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA				
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA				

Tabla 1: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 si la pareja de cultivos con mayor rentabilidad es la misma para tres categorías de superficie. Elaboración propia. (2024).

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO CON MAYOR RENTABILIDAD	CULTIVO CON SEGUNDA MAYOR RENTABILIDAD	AÑO	SECANO	RED ELÉCTRICA	ENERGÍA SOLAR
2020	SECANO	GIRASOL	TRIGO	2024	GIRASOL	CÁRTAMO	REMOLACHA
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA	2025	TRIGO	REMOLACHA	CÁRTAMO
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA	2026	GIRASOL	BARBECHO	REMOLACHA
2021	SECANO	GIRASOL	TRIGO	2027	TRIGO	CÁRTAMO	BARBECHO
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA	2028	BARBECHO	REMOLACHA	CÁRTAMO
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA	2029	GIRASOL	CÁRTAMO	REMOLACHA
2022	SECANO	GIRASOL	TRIGO	2030	TRIGO	REMOLACHA	CÁRTAMO
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA	2031	GIRASOL	BARBECHO	REMOLACHA
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA	2032	TRIGO	CÁRTAMO	BARBECHO
2023	SECANO	GIRASOL	TRIGO	2033	BARBECHO	REMOLACHA	CÁRTAMO
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA				
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA				

Tabla 2: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 si la pareja de cultivos con mayor rentabilidad es la misma para dos categorías de superficie. Elaboración propia. (2024).

Utilizaremos las siguientes operaciones para determinar la rentabilidad de cada cultivo y seleccionar el par de cultivos más rentables para cada categoría de superficie tras ejecutar nuestro modelo matemático:

-Ingreso bruto por cultivo (I_i):

Ec10.

$$(I_i = R_i * P_i * S_i)$$

Donde S_i es la superficie por hectárea del cultivo i (ha), R_i es el rendimiento por hectárea del cultivo i (ton/ha) y P_i es el precio de mercado por tonelada del cultivo i (€/ton).

-Costo de producción por cultivo (C_i):

$$Ec11. \quad (C_i = (C_{si} + C_{ti}) * S_i)$$

Siendo C_{si} el costo de los insumos para el cultivo i (€) y C_{ti} el costo de la mano de obra y otros costos variables para el cultivo i (€).

-Beneficio bruto por cultivo:

$$Ec12. \quad (B_i = I_i - C_i)$$

Fijamos como criterio que se toma por cultivo más rentable el que acumule el mayor número de campañas siendo el cultivo con mayor rentabilidad, puesto que estadísticamente proporciona una mayor rentabilidad. Si dos cultivos acumulan el mismo número de campañas siendo el cultivo con mayor rentabilidad, entonces optaremos por el que obtuvo un mayor beneficio neto total en dichas campañas.

-Disponibilidad de agua:

$$Ec13. \quad (S_i a_i \leq V_R)$$

$$Ec14. \quad (a_i = \frac{N_{i2020} + N_{i2021} + N_{i2022} + N_{i2023}}{4})$$

Siendo a_i el rendimiento promedio de agua del cultivo i (m^3/ha), N_i el rendimiento de agua por cultivo i de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, y V_R el volumen de agua disponible anualmente procedente de fuentes renovables. Se comprobará antes de materializar el plan de cultivo de cada campaña, que, con las hectáreas seleccionadas regadas por medio de energía solar, el consumo hídrico que tendrían no supere nuestra disponibilidad de agua. Teniendo en cuenta que nuestro V_R es aproximadamente de 336625.138 m^3 y tomando como rendimiento de agua por cultivo el rendimiento promedio de agua por cultivo de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. El mero hecho de que nuestro plan de cultivos rote entre un par de cultivos hace que recopilemos con mayor frecuencia información sobre las necesidades hídricas de estos cultivos, otorgando una mayor precisión al realizar esta comprobación.

Puesto que las necesidades hídricas fluctúan con las condiciones climatológicas de cada campaña, para determinar cuántas hectáreas de superficie con energía solar o con red eléctrica sembramos con el par de cultivos con mayor rentabilidad, hacemos la media de las hectáreas obtenidas con suministro de energía solar en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

$$\text{Ec15.} \quad (H_{s1} = \frac{H_{s1_2020} + H_{s1_2021} + H_{s1_2022} + H_{s1_2023}}{4})$$

$$\text{Ec16.} \quad (H_{s2} = \frac{H_{s2_2020} + H_{s2_2021} + H_{s2_2022} + H_{s2_2023}}{4})$$

Siendo H_{s1_k} (ha) las hectáreas regadas con energía solar y sembradas con el cultivo con mayor rentabilidad en la campaña k , y H_{s2_k} (ha) las hectáreas regadas con energía solar y sembradas con el cultivo con la segunda mayor rentabilidad en la campaña k .

H_{s1} es la media de las hectáreas obtenidas con suministro de energía solar para el cultivo con mayor rentabilidad en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. H_{s1} es la media de las

hectáreas obtenidas con suministro de energía solar para el cultivo con segunda mayor rentabilidad en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

La diferencia con el total de superficie de regadío será el promedio de la superficie de red eléctrica.

$$**Ec17.** \quad (H_{r1} = 290 - H_{s1})$$

$$**Ec18.** \quad (H_{r2} = 290 - H_{s2})$$

H_{r1} es la media de las hectáreas obtenidas con suministro de red eléctrica para el cultivo con mayor rentabilidad en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. H_{r2} es la media de las hectáreas obtenidas con suministro de red eléctrica para el cultivo con segunda mayor rentabilidad en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

3. Escenario de impacto y resultados esperados

En este apartado, discutiremos los posibles beneficios en términos de aumento de la rentabilidad económica de nuestra explotación.

Tras analizar los precios, costes y rendimientos por cultivos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023; podemos esperar que, dentro de los cultivos de regadío, aquellos cultivos regados mediante energía solar presenten una mayor rentabilidad que los cultivos regados mediante energía procedente de la red eléctrica. También podemos esperar que cultivos con grandes necesidades hídricas den mayores producciones en parcelas de regadío, como por ejemplo la remolacha. Además, puesto que para la venta del cártamo se ha negociado un contrato en el que se repercute al distribuidor el coste del riego al precio de la red, en la superficie cuyo riego es abastecido por energía solar se espera que este cultivo tenga una gran

rentabilidad. Al fin y al cabo, no solo estamos comercializando la producción de dicho cultivo, sino que también estamos vendiendo energía solar.

En lo que respecta a nuestro modelo matemático esperamos que, tras ejecutarlo en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, obtengamos un beneficio neto total por campaña mayor que los resultados históricos registrados en dichas campañas. En este supuesto, habríamos logrado crear una herramienta de gestión agrícola que mejorase la realidad de nuestra explotación y optimizase nuestros rendimientos. Por ello, extraeríamos información valiosa para estimar la rentabilidad que obtendremos en la campaña de 2024, y establecer planes de cultivo óptimos para las próximas campañas.

Adicionalmente, para verificar la efectividad de los resultados del modelo en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, los hemos comparado también con el promedio de todos los cultivos calculado agrupándolos por cada tipología de superficie. El promedio de todos los cultivos agrupados por cada tipología de superficie se obtuvo haciendo la media de los beneficios por hectárea registrados por cultivo en las campañas de 2020 a 2024.

$$\text{Ec19.} \quad (B_{T_modelo} > B_{T_promedio})$$

El beneficio neto total promedio por campaña (B_i en €) será la suma del beneficio neto de la superficie de secano (B_{secano} en €), de regadío suministrado por la red eléctrica (B_{red} en €) y de regadío suministrado por la energía solar (B_{solar} en €).

$$\text{Ec20.} \quad (B_{T_promedio} = B_{secano} + B_{red} + B_{solar})$$

En los tres casos, B_{secano} , B_{red} y B_{solar} , calcularemos una media de su beneficio neto por hectárea incluyendo todos los cultivos compatibles con su correspondiente tipología de superficie ($B_{categoria\ superficie\ por\ ha}$ en €/ha).

$$Ec21. \quad (B_{\text{categoría superficie por ha}} = \frac{B_{\text{cultivo 1}} + B_{\text{cultivo 2}} + \dots + B_{\text{cultivo j}}}{j})$$

Siendo $B_{\text{cultivo 1}}, B_{\text{cultivo 2}}, \dots, B_{\text{cultivo j}}$, el beneficio neto por hectárea en € de cada cultivo j de su correspondiente categoría de superficie.

En el caso del beneficio neto promedio por campaña de la superficie de secano (B_{secano} en €) se calcula como:

$$Ec22. \quad (B_{\text{secano}} = B_{\text{secano por ha}} * 510)$$

En el caso del beneficio neto promedio por campaña de la superficie de energía solar (B_{solar} en €) se calcula como:

$$Ec23. \quad (B_{\text{solar}} = B_{\text{solar por ha}} * S_{\text{solar}})$$

$$Ec24. \quad (S_{\text{solar}} = \frac{336625.138 * j}{N_{\text{cultivo 1}} + \dots + N_{\text{cultivo j}}})$$

Donde S_{solar} es la superficie media en hectáreas suministrada por energía solar que podría ser sembrada en dicha campaña con el promedio de las necesidades hídricas de los j cultivos ($N_{\text{cultivo 1}}, \dots, N_{\text{cultivo j}}$ en m³/ha).

En el caso del beneficio neto promedio por campaña de la superficie de red solar (B_{red} en €) se calcula como:

$$Ec25. \quad (B_{red} = B_{red\ por\ ha} * S_{red})$$

$$Ec26. \quad (S_{red} = 290 - S_{solar})$$

Siendo S_{solar} es la superficie media en hectáreas suministrada por la red eléctrica que podría ser sembrada en dicha campaña.

4. Escenario de proyección a futuro

En este apartado, proyecto el impacto a largo plazo de las mejoras implementadas en la explotación agrícola y establezco los ajustes pertinentes para asegurar que la eficacia de nuestro modelo matemático perdure en el tiempo.

La volatilidad y fluctuación del sector agrícola hacen que resulte conveniente realizar un plan de cultivo flexible ante nuevos acontecimientos. Es por ello que anualmente ejecutaremos nuestro modelo matemático actualizando los precios y costes de esa campaña, y empleando la producción y necesidades hídricas promedio de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Éstas dos últimas, resultarán clave para estimar la campaña de 2024. Mientras que los precios y costes de los cultivos agrícolas fluctúan frecuentemente por el principio de oferta y demanda, sus producciones y necesidades hídricas son más constantes al depender estructuralmente del tipo de tierra y de la climatología de la zona.

-Producción promedio por cada cultivo i (P_i):

$$Ec27. \quad (P_i = \frac{P_{i\ 2020} + P_{i\ 2021} + P_{i\ 2022} + P_{i\ 2023}}{4})$$

PRODUCCIONES PROMEDIO DE LAS CAMPAÑAS DE 2020-2023	
REGADIO	
CULTIVO	CANTIDAD (Kg/ha)
CEBADA	3543.464722
TRIGO	3953.3
GIRASOL	2803.2275
REMOLACHA	99539.8275

Tabla 3: Producciones promedio en los cultivos de regadío de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).

PRODUCCIONES PROMEDIO DE LAS CAMPAÑAS DE 2020-2023	
SECANO	
CULTIVO	CANTIDAD (Kg/ha)
CEBADA	1698.5025
TRIGO	1973.7725
GIRASOL	1037.1625

Tabla 4: Producciones promedio en los cultivos de secano de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).

-Necesidades hídricas promedio por cada cultivo i (N_i):

Ec28.

$$(N_i = \frac{N_{i\ 2020} + N_{i\ 2021} + N_{i\ 2022} + N_{i\ 2023}}{4})$$

NECESIDADES HÍDRICAS PROMEDIO DE LAS CAMPAÑAS DE 2020-2023	
CULTIVO	DOSIS (m³/ha)
CEBADA	1898.4625
TRIGO	2763.245
CÁRTAMO	3099.2475
GIRASOL	1904.355
REMOLACHA	5959.1

Tabla 5: Necesidades hídricas promedio en los cultivos de secano de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).

Sin embargo, cada 20 años optaremos por una etapa transitoria de 4 campañas donde se implantarán todos los cultivos compatibles para nuestra explotación, para registrar un muestreo actualizado de sus producciones y necesidades hídricas de cada cultivo, en nuestro modelo matemático. Además, no habrá barbecho, y se evitará repetir anualmente el mismo cultivo en el mismo recinto. Emplearemos las necesidades hídricas promedio de la etapa transitoria previa para calcular como distribuir nuestros cultivos de regadío dentro de la explotación. Mediante la programación lineal emplearemos una aproximación iterativa para respetar la limitación de agua disponible extraída con energía solar y mantener la superficie de cultivo lo más similares posibles.

Por ejemplo, para la etapa transitoria de 2044 a 2047 tendríamos anualmente el siguiente plan de cultivos:

AÑO	TIPOLOGÍA	CULTIVO	Ha
2044-2047	SECANO	CEBADA	127.5
		TRIGO	127.5
		CÁRTAMO	127.5
		GIRASOL	127.5
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	45.6
		TRIGO	45.6
		CÁRTAMO	45.6
		GIRASOL	45.6
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	45.6
		CEBADA	21.5
		TRIGO	21.5
		CÁRTAMO	21.5
		GIRASOL	21.5
		REMOLACHA	21.5

Tabla 6: Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).

En el Anexo 1 podemos encontrar detalladamente el procedimiento seguido para obtener estos resultados.

Por último, cambios determinantes como la ampliación de los paneles solares o modificaciones en la infraestructura de riego obligarían a cambiar ciertos parámetros volver a ejecutar nuestro modelo matemático.

Conclusión de la definición del modelo y del planteamiento de hipótesis.

En este capítulo, hemos desarrollado un modelo matemático basado en la programación lineal, cuyo objetivo es maximizar la rentabilidad de la explotación agrícola en Mayorga de Campos. Hemos definido los objetivos y especificaciones técnicas del modelo, destacando la importancia de optimizar el uso de recursos como el agua y la energía renovable. Además, hemos detallado las variables y restricciones clave, asegurando que el modelo se adapte a las condiciones específicas de la explotación.

Por otro lado, hemos planteado diferentes hipótesis que guiarán las ejecuciones de nuestro proyecto. Para proporcionar una visión completa, hemos creado diversos escenarios, incluyendo el actual, la implementación de mejoras, el impacto y resultados esperados, y la proyección a futuro. Cada uno de estos escenarios han sido detallados con sus pertinentes fórmulas y un enfoque analítico para evaluar su viabilidad. Es fundamental que nuestro modelo logre mejorar los resultados históricos registrados de la explotación agrícola.

La relevancia de este capítulo radica en que este modelo será la base para tomar decisiones informadas sobre la gestión de cultivos en la explotación agrícola, ajustándose a los diferentes escenarios planteados. En éste se proporciona el marco conceptual sobre el cual se construirá todo el proyecto.

Los siguientes capítulos profundizarán en la implementación, validación y análisis de los resultados obtenidos, proporcionando una visión detallada de la viabilidad y beneficios de las estrategias propuestas. Todo ello se perfeccionará con una evaluación de riesgo y retorno, complementaria a nuestro modelo.

4. Desarrollo del modelo y contrastación de las hipótesis.

En este capítulo, hemos ajustado nuestro modelo matemático utilizando los datos históricos registrados en las campañas de 2020, 2021, 2023 y 2024, y sus ejecuciones nos han permitido contrastar nuestras hipótesis. Pondré el foco en desarrollar un modelo funcional que sirva como herramienta principal para la creación de planes de mejora que optimicen la rentabilidad de cada campaña, sentando así los cimientos de nuestro proyecto.

Además, este apartado incluye la implementación del modelo en Matlab y la evaluación de su robustez bajo diferentes escenarios. El objetivo es verificar la consistencia y efectividad del modelo en mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la explotación agrícola. Este apartado es fundamental para asegurar que nuestras estrategias sean efectivas y ajustables a nuestra explotación.

Ejecución del modelo desarrollado.

Para la elaboración del modelo matemático se ha empleado como base de datos el históricos registrados de las producciones y costes por cultivo de las campañas 2020, 2021, 2022 y 2023. Se tomaron las campañas registradas más cercanas para contar con las condiciones climatológicas, costes y precios con la mayor similitud posible respecto a los actuales. Los beneficios por hectárea que podemos encontrar en ambas tablas son los coeficientes de las variables independientes de la función objetivo definida en nuestro modelo matemático. Tras ejecutar nuestro modelo matemático con estos datos históricos obtendremos las combinaciones de cultivos que nos hubieran proporcionado la mayor rentabilidad económica posible en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

DATOS HISTÓRICOS REGISTRADOS CAMPAÑAS 2020 Y 2021

AÑO	CATEGORÍA	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	Superficie (Ha)	Beneficio (€)
2020	SECANO	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	218.00	40.94	115.00	4707.55
		TRIGO SECANO	1967.87	170.00	334.54	255.78	78.76	200.00	15751.58
		GIRASOL SECANO	987.44	345.00	340.67	297.00	43.67	150.00	6550.02
		CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00	45.00	3600.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	446.00	100.84	44.00	4437.14
		TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	536.80	181.20	45.00	8153.78
		GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	966.17	701.00	265.17	32.00	8485.41
		CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00	35.00	15750.00
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2107.00	346.67	28.00	9706.83
		CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	334.63	212.22	22.00	4668.82
		TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	376.81	341.19	22.00	7506.18
		GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	966.17	588.85	377.32	20.00	7546.41
2021	SECANO	CÁRTAMO REGADIO			800.00	171.10	628.90	20.00	12578.02
		REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	1757.00	696.67	22.00	15326.79
		CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	317.00	34.43	45.00	1549.34
		TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	369.00	65.68	150.00	9851.58
	RED ELÉCTRICA	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	380.00	171.39	115.00	19709.84
		CÁRTAMO SECANO			800.00	350.00	450.00	200.00	90000.00
		CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	576.00	79.96	32.00	2558.80
		TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	846.38	720.00	126.38	28.00	3538.51
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1191.00	250.31	35.00	8760.85
		CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00	45.00	20250.00
		REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2689.00	183.78	44.00	8086.48
		CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	461.85	194.11	22.00	4270.45
ENERGÍA SOLAR	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	846.38	555.45	290.93	22.00	6400.38	
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1077.57	363.74	20.00	7274.80	
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	166.70	633.30	22.00	13932.71	
	REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2335.38	537.41	20.00	10748.13	

DATOS HISTÓRICOS REGISTRADOS CAMPAÑAS 2022 Y 2023									
AÑO	CATEGORÍA	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	Superficie (Ha)	Beneficio (€)
2022	SECANO	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	397.00	62.29	150.00	9344.06
		TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	532.00	96.56	45.00	4345.41
		GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	560.00	214.29	200.00	42858.10
		CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00	115.00	9200.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	896.00	161.31	35.00	5645.91
		TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1276.51	1090.00	186.51	44.00	8206.50
		GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1590.00	358.07	28.00	10025.95
		CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00	32.00	14400.00
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2995.00	302.00	45.00	13590.00
		CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	779.60	277.72	22.00	6109.74
		TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1276.51	920.54	355.97	22.00	7831.29
		GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1475.22	472.85	22.00	10402.79
2023	SECANO	CÁRTAMO REGADIO			800.00	174.64	625.36	20.00	12507.20
		REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2638.02	658.98	20.00	13179.65
		CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	357.00	43.90	200.00	8780.30
		TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	402.00	88.24	115.00	10147.69
	RED ELÉCTRICA	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	352.00	33.00	45.00	1485.00
		CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00	150.00	12000.00
		CEBADA REGADIO	3678.87	230.00	846.14	696.00	150.14	45.00	6756.30
		TRIGO REGADIO	3679.04	252.00	927.12	820.00	107.12	32.00	3427.78
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	901.00	203.95	44.00	8973.80
		CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00	28.00	12600.00
		REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2701.00	296.80	35.00	10387.95
		CEBADA REGADIO	3678.87	230.00	846.14	589.40	256.74	22.00	5648.37
ENERGÍA SOLAR	TRIGO REGADIO	3679.04	252.00	927.12	661.16	265.96	22.00	5851.13	
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	791.44	313.51	20.00	6270.14	
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	155.34	644.66	20.00	12893.26	
	REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2353.71	644.09	22.00	14170.01	

Tablas 7 y 8: Datos históricos de los beneficios promedio por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Las siguientes gráficas facilitan observar cómo ha sido la evolución de los beneficios por hectárea de nuestros cultivos con el transcurso del tiempo. Posteriormente, analizaremos el contexto en el que tuvo lugar cada campaña.

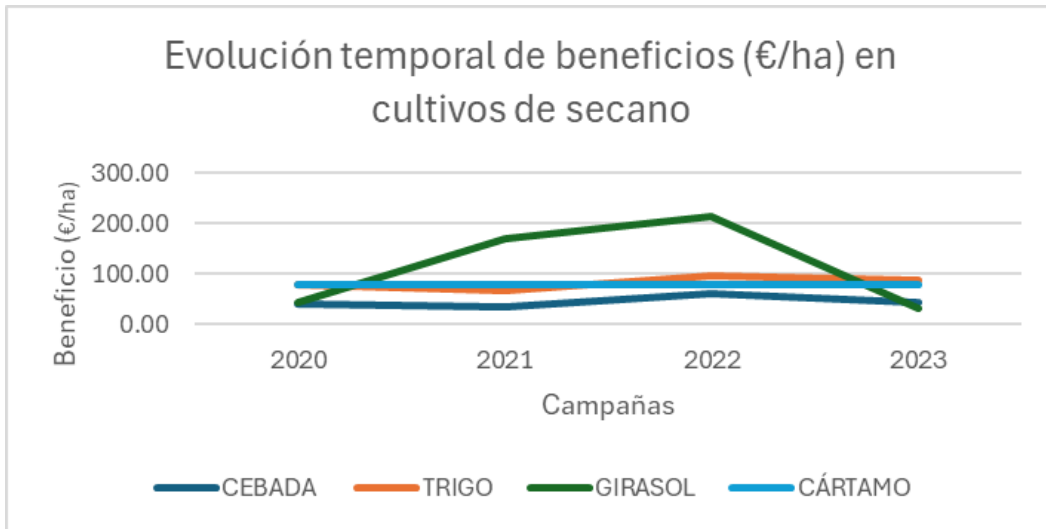


Figura 8: Evolución temporal de los beneficios de los cultivos de secano para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

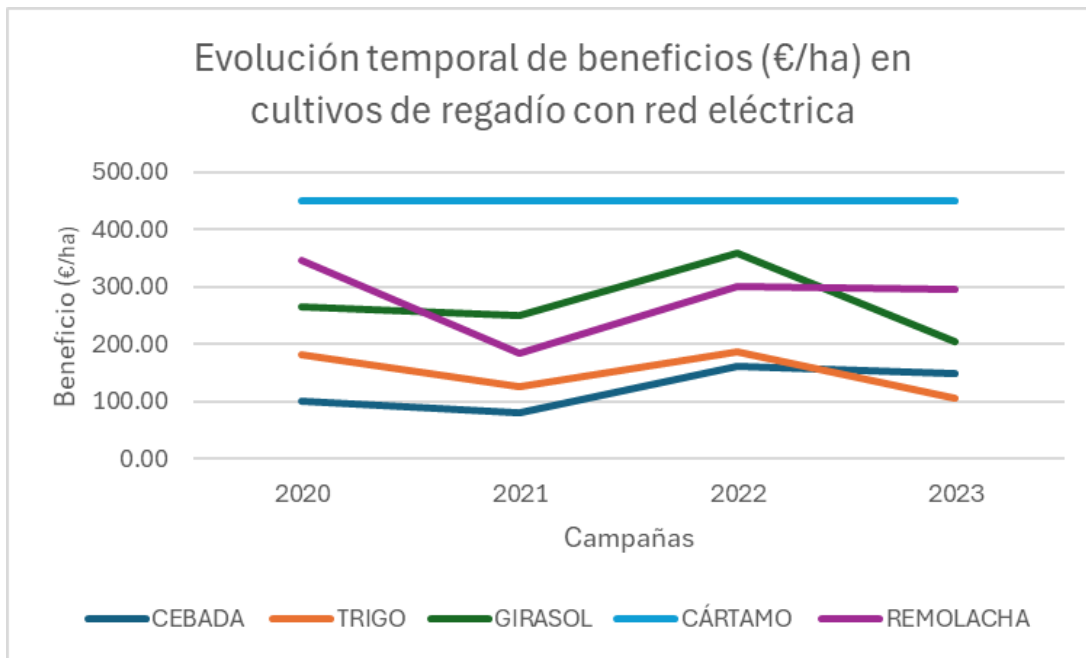


Figura 9: Evolución temporal de los beneficios de los cultivos de regadío con red eléctrica para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

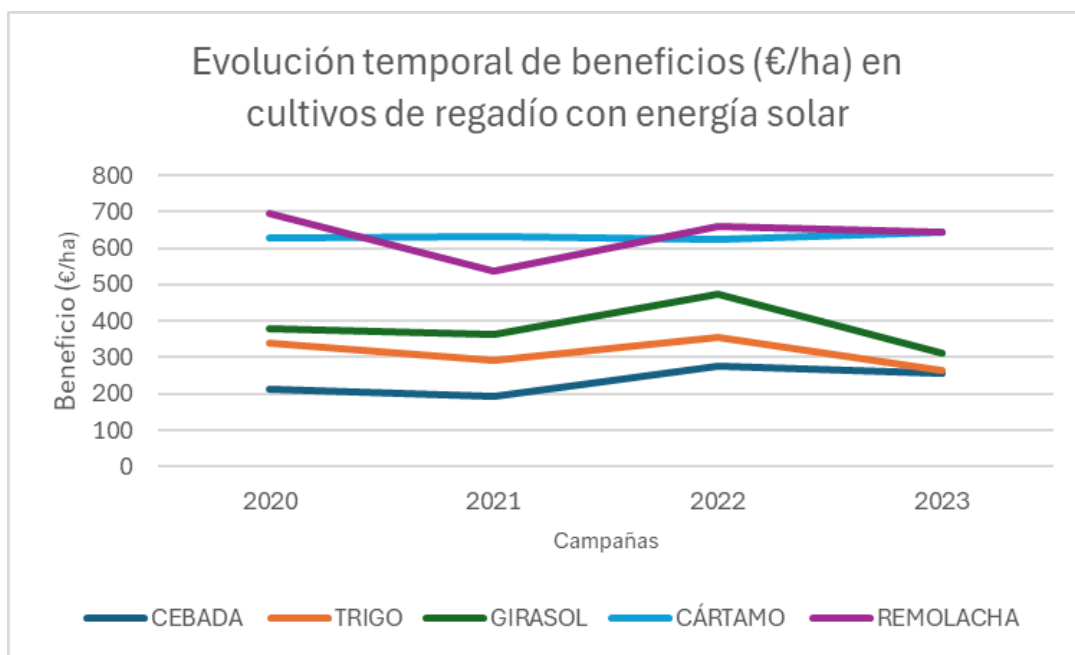


Figura 10: Evolución temporal de los beneficios de los cultivos de regadío energía solar para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Adicionalmente, mostraré el desglose de los gastos que fueron pormenorizados para cada cultivo por hectárea en cada campaña. Por ello analizaremos primero los gastos históricos totales que se tuvieron por campaña.

REGISTRO HISTÓRICO DE GASTOS (€)				
	2020	2021	2022	2023
ABONOS Y HERBICIDAS	113671.47	257327.58	364446.13	223543.08
RECOLECCION REMOLACHA	738.57	765.21	773.21	751.91
SIMIENTE	8307.42	9157.84	10234.54	8820.32
GASTOS COSECHADORA	13500.00	13500.00	13500.00	13500.00
POTENCIA FACTURADA	9146.65	9146.65	9146.65	9146.65
ENERGÍA FACTURADA	34759.76	39048.89	39426.03	35322.91
REPARACIONES Y CONSERVACIÓN	42523.97	45189.71	47387.87	42523.97
AMORTIZACIÓN	32759.59	33245.46	33758.98	35893.32
SUELDOS Y SALARIOS	43371.30	44499.40	44977.10	46781.46
SEGUROS SOCIALES	5561.64	5561.64	5561.64	5561.64
GASOLEO	19635.85	25343.51	26789.37	20134.93
SEGUROS	6547.37	6564.11	6599.62	6643.32
SERVICIO DE PREVENCIÓN	261.88	261.88	261.88	261.88
PROGRAMA NÓMINAS	320.07	320.07	320.07	320.07
TASAS MUNICIPALES	2032.89	2032.89	2032.89	2032.89
TOTAL (€)	333138.42	491964.83	605215.96	451238.34

Tabla 9: Registro históricos de los gastos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.
Elaboración propia. (2024).

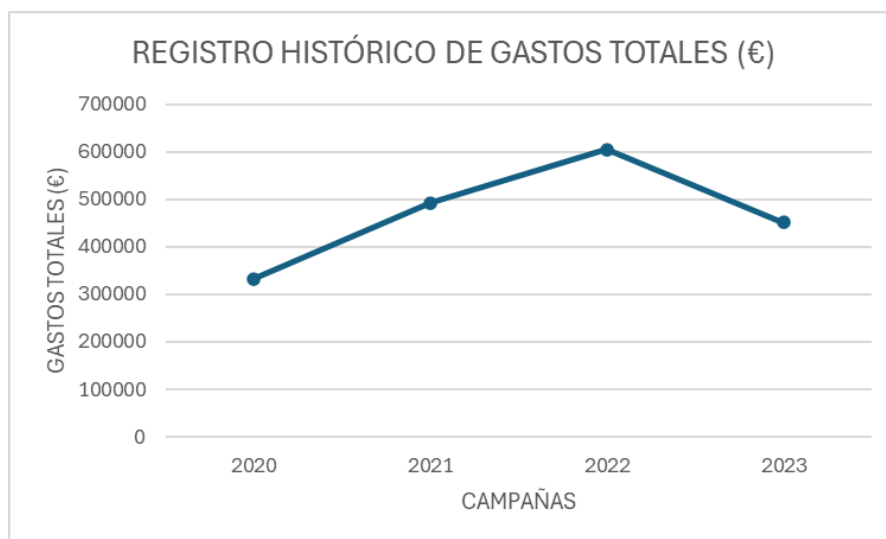


Figura 11: Evolución temporal de los gastos en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. *Elaboración propia (2024).*

En lo que respecta al desglose de los gastos pormenorizados para cada cultivo por hectárea en cada campaña, detallo cómo obtuvimos el coste de la electricidad de riego. En cada una de estas campañas registramos los consumos hídricos de cada cultivo por hectárea y asumimos un coste en electricidad de 0.0839 €/Kwh (0.059€/m³), obteniendo el gasto en energía facturada por hectárea para cada cultivo regado tomando energía de la red. Para los cultivos regados a través de la energía generada por los paneles solares, establecemos un coste de riego compuesto por la amortización de la inversión en la instalación fotovoltaica y el coste eléctrico de encontrarse hibridado con la red con un ratio del 10% de red. Además, en el caso del cultivo del cártamo este sería el coste total agrícola sin considerar las cláusulas contractuales negociadas con “Campos Amarillos”.

Consumo hídricas por cultivo y coste eléctrico por hectárea				
AÑO	CULTIVO	DOSIS (m3/ha)	€/m3	COSTE RIEGO (€/ha)
2020	CEBADA REGADIO	1885.63	0.059	111.37
	TRIGO REGADIO	2708.79	0.059	159.99
	GIRASOL REGADIO	1898.78	0.059	112.15
	CÁRTAMO REGADIO	3028.88	0.059	178.90
	REMOLACHA	5925.67	0.059	350.00
2021	CEBADA REGADIO	1932.59	0.059	114.15
	TRIGO REGADIO	2785.93	0.059	164.55
	GIRASOL REGADIO	1920.43	0.059	113.43
	CÁRTAMO REGADIO	3103.44	0.059	183.30
	REMOLACHA	5987.01	0.059	353.62
2022	CEBADA REGADIO	1970.77	0.059	116.40
	TRIGO REGADIO	2868.98	0.059	169.46
	GIRASOL REGADIO	1943.36	0.059	114.78
	CÁRTAMO REGADIO	2968.93	0.059	175.36
	REMOLACHA	6043.89	0.059	356.98
2023	CEBADA REGADIO	1804.86	0.059	106.60
	TRIGO REGADIO	2689.28	0.059	158.84
	GIRASOL REGADIO	1854.85	0.059	109.56
	CÁRTAMO REGADIO	3295.74	0.059	194.66
	REMOLACHA	5879.83	0.059	347.29

Tabla 10: Consumo hídricos y coste eléctrico por cultivo de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

DESGLOSE DE COSTES POR CULTIVO (€/ha)										
AÑO	CATEGORÍA	CULTIVO	ABONOS Y HERBICIDAS	SIMIENTE	COSECHADORA	GASOLINA	SUELDOS Y SALARIOS	COSTES FIJOS	ELECTRICIDAD RIEGO	COSTE TOTAL (€/ha)
2020	SECANO	CEBADA	30.00	14.00	50.00	25.00	80.00	19.00	0.00	218.00
		TRIGO	66.78	15.00	50.00	25.00	80.00	19.00	0.00	255.78
		GIRASOL	94.00	29.00	50.00	25.00	80.00	19.00	0.00	297.00
		CÁRTAMO	84.00	12.00	0.00	25.00	30.00	19.00	0.00	150.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	146.63	14.00	50.00	25.00	80.00	19.00	111.37	446.00
		TRIGO	187.81	15.00	50.00	25.00	80.00	19.00	159.99	536.80
		GIRASOL	385.85	29.00	50.00	25.00	80.00	19.00	112.15	701.00
		CÁRTAMO	294.00	12.00	0.00	25.00	80.00	19.00	178.90	608.90
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	1461.85	89.00	72.15	25.00	90.00	19.00	350.00	2107.00
		CEBADA	125.49	14.00	50.00	25.00	80.00	19.00	21.14	334.63
		TRIGO	161.81	15.00	50.00	25.00	80.00	19.00	26.00	376.81
		GIRASOL	364.63	29.00	50.00	25.00	80.00	19.00	21.22	588.85
2021	SECANO	CÁRTAMO	115.10	12.00	0.00	25.00	80.00	19.00	27.89	278.99
		REMOLACHA	1428.85	89.00	72.15	25.00	80.00	19.00	45.00	1757.00
		CEBADA	100.12	38.00	50.00	27.00	82.88	19.00	0.00	317.00
		TRIGO	151.12	39.00	50.00	27.00	82.88	19.00	0.00	369.00
	RED ELÉCTRICA	GIRASOL	150.12	51.00	50.00	27.00	82.88	19.00	0.00	380.00
		CÁRTAMO	60.00	14.00	0.00	27.00	32.88	19.00	0.00	152.88
		CEBADA	244.97	38.00	50.00	27.00	82.88	19.00	114.15	576.00
		TRIGO	337.57	39.00	50.00	27.00	82.88	19.00	164.55	720.00
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL	847.69	51.00	50.00	27.00	82.88	19.00	113.43	1191.00
		CÁRTAMO	290.00	14.00	0.00	27.00	82.88	19.00	183.30	616.18
		REMOLACHA	2030.55	103.00	72.95	27.00	82.88	19.00	353.62	2689.00
		CEBADA	223.56	38.00	50.00	27.00	82.88	19.00	21.41	461.85
RED ELÉCTRICA	TRIGO	311.11	39.00	50.00	27.00	82.88	19.00	26.46	555.45	
	GIRASOL	826.35	51.00	50.00	27.00	82.88	19.00	21.34	1077.57	
	CÁRTAMO	106.70	14.00	0.00	27.00	82.88	19.00	28.33	277.91	
	REMOLACHA	1985.18	103.00	72.95	27.00	82.88	19.00	45.36	2335.38	

DESGLOSE DE COSTES POR CULTIVO (€/ha)										
AÑO	CATEGORÍA	CULTIVO	ABONOS Y HERBICIDAS	SIMIENTE	COSECHADORA	GASOLINA	SUELDOS Y SALARIOS	COSTES FIJOS	ELECTRICIDAD RIEGO	Coste Total (€/ha)
2022	SECANO	CEBADA	148.01	67.00	50.00	29.00	83.99	19.00	0.00	397.00
		TRIGO	272.01	78.00	50.00	29.00	83.99	19.00	0.00	532.00
		GIRASOL	285.01	93.00	50.00	29.00	83.99	19.00	0.00	560.00
		CÁRTAMO	57.00	15.00	0.00	29.00	33.99	19.00	0.00	153.99
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	530.61	67.00	50.00	29.00	83.99	19.00	116.40	896.00
		TRIGO	680.55	78.00	50.00	29.00	83.99	19.00	169.46	1090.00
		GIRASOL	1200.23	93.00	50.00	29.00	83.99	19.00	114.78	1590.00
		CÁRTAMO	287.00	15.00	0.00	29.00	83.99	19.00	175.36	609.35
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	2298.84	134.00	73.19	29.00	83.99	19.00	356.98	2995.00
		CEBADA	508.97	67.00	50.00	29.00	83.99	19.00	21.64	779.60
		TRIGO	633.61	78.00	50.00	29.00	83.99	19.00	26.95	920.54
		GIRASOL	1178.75	93.00	50.00	29.00	83.99	19.00	21.48	1475.22
2023	SECANO	CÁRTAMO	111.64	15.00	0.00	29.00	83.99	19.00	27.54	286.17
		REMOLACHA	2253.14	134.00	73.19	29.00	83.99	19.00	45.70	2638.02
		CEBADA	126.41	45.00	50.00	32.00	84.59	19.00	0.00	357.00
		TRIGO	168.41	48.00	50.00	32.00	84.59	19.00	0.00	402.00
	RED ELÉCTRICA	GIRASOL	112.41	54.00	50.00	32.00	84.59	19.00	0.00	352.00
		CÁRTAMO	54.00	15.00	0.00	32.00	34.59	19.00	0.00	154.59
		CEBADA	358.81	45.00	50.00	32.00	84.59	19.00	106.80	696.00
		TRIGO	427.57	48.00	50.00	32.00	84.59	19.00	158.84	620.00
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL	551.85	54.00	50.00	32.00	84.59	19.00	109.56	901.00
		CÁRTAMO	284.00	15.00	0.00	32.00	84.59	19.00	194.66	629.25
		REMOLACHA	2032.57	113.00	72.55	32.00	84.59	19.00	347.29	2701.00
		CEBADA	338.15	45.00	50.00	32.00	84.59	19.00	20.66	569.40
ENERGÍA SOLAR	TRIGO	401.68	48.00	50.00	32.00	84.59	19.00	25.88	661.16	
	GIRASOL	530.90	54.00	50.00	32.00	84.59	19.00	20.96	791.44	
	CÁRTAMO	89.34	15.00	0.00	32.00	84.59	19.00	29.47	269.40	
	REMOLACHA	1987.84	113.00	72.55	32.00	84.59	19.00	44.73	2353.71	

Tabla 11 y 12: Desglose de costes por cultivos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Los costes totales mostrados en este desglose de costes por cultivo y por categoría de recinto, son las cuantías que trataremos de amortizar periódicamente en cada campaña. Las ventas de nuestras producciones deberán superar estas cifras para evitar resultados de ejercicio negativos.

Adicionalmente, obsérvese como en la columna “Costes fijos” de la tabla 11, hemos añadido los costes fijos como los seguros, seguros sociales, las tasas municipales o el programa de nóminas, dividiéndolos de forma equitativa entre todas las hectáreas de la explotación. En la columna de “Cosechadora” podemos ver cómo la remolacha resulta más costosa de segar puesto que es necesario alquilar un peine especial ajustable a la cosechadora. Por último, en la columna de “abonos y herbicidas” podemos ver cómo se emplea mucho más abono en regadío que en secano y apenas se emplean en el cultivo del cártamo al necesitarlo poco.

Puesto que en las hectáreas arrendadas a la empresa “Campos Amarillos” se repercute el coste del riego, se evita el gasto en mano de obra y en la cosechadora, este sería el desglose de costes que supondría el cultivo del cártamo desde nuestro balance como propietarios.

DESGLOSE DE LOS COSTES DEL CÁRTAMO (€/ha)									
AÑO	CATEGORÍA	ABONOS Y HERBICIDAS	SIMIENTE	COSECHADORA	GASOLINA	SUELDOS Y SALARIOS	COSTES FIJOS	ELECTRICIDAD RIEGO	COSTE TOTAL (€/ha)
2020	SECANO	64.00	12.00	0.00	25.00	0.00	19.00	0.00	120.00
	RED ELÉCTRICA	294.00	12.00	0.00	25.00	0.00	19.00	0.00	350.00
	ENERGÍA SOLAR	115.10	12.00	0.00	25.00	0.00	19.00	0.00	171.10
2021	SECANO	60.00	14.00	0.00	27.00	0.00	19.00	0.00	120.00
	RED ELÉCTRICA	290.00	14.00	0.00	27.00	0.00	19.00	0.00	350.00
	ENERGÍA SOLAR	108.70	14.00	0.00	27.00	0.00	19.00	0.00	168.70
2022	SECANO	57.00	15.00	0.00	29.00	0.00	19.00	0.00	120.00
	RED ELÉCTRICA	287.00	15.00	0.00	29.00	0.00	19.00	0.00	350.00
	ENERGÍA SOLAR	111.64	15.00	0.00	29.00	0.00	19.00	0.00	174.64
2023	SECANO	54.00	15.00	0.00	32.00	0.00	19.00	0.00	120.00
	RED ELÉCTRICA	284.00	15.00	0.00	32.00	0.00	19.00	0.00	350.00
	ENERGÍA SOLAR	89.34	15.00	0.00	32.00	0.00	19.00	0.00	155.34

Tabla 13: Desglose de los costes del cártamo con las condiciones contractuales en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

En las ejecuciones de dicho modelo se establecen una serie de restricciones, en lo referente a la disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable se toman 336625.138 m³ de agua y para la superficie disponible en cultivos de regadío se toman 290 ha y en cultivos de secano se toman 510 ha. Las necesidades hídricas de cada uno de nuestros cultivos fluctúan en función de las condiciones meteorológicas de cada año y del momento en que tuvo lugar la siembra. Al ejecutar nuestro modelo, para los coeficientes de las variables independientes de la restricción de la disponibilidad anual de agua extraída, se toman las dosis anuales en m³ de agua por hectárea que necesitó cada cultivo en las campañas de 2020,2021,2022 y 2023. En la Tabla 3 podemos observar las cantidades que se registraron:

AÑO	2020	2021	2022	2023
CULTIVO	DOSIS (m ³ /ha)			
CEBADA REGADIO	1885.63	1932.59	1970.77	1804.86
TRIGO REGADIO	2708.79	2785.93	2868.98	2689.28
GIRASOL REGADIO	1898.78	1920.43	1943.36	1854.85
CÁRTAMO REGADIO	3028.88	3103.44	2968.93	3295.74
REMOLACHA	5925.67	5987.01	6043.89	5879.83

Tabla 14: Necesidades hídricas anuales promedio registradas en m³/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Para clarificar como se ha ejecutado el modelo matemático a través de la programación lineal en Matlab, mostramos un ejemplo numérico con los valores de la campaña de 2020. Cabe destacar que dicho programa cuenta con el algoritmo simplex para poder resolver este modelo matemático a través del “Método Simplex”. En el Anexo 2 muestro el desarrollo matemático completo para el resto de las campañas. Esta fue la función objetivo y las restricciones empleadas para la campaña 2020:

Campaña 2020:

• **Función objetivo:**

$$Ec29. \quad (N = 100.84 * S_1 + 40.93 * S_2 + 181.19 * S_3 + 78.75 * S_4 + 265.17 * S_5 + 43.66 * S_6 + 450 * S_7 + 80 * S_8 + 346.67 * S_9 + 212.22 * S_{10} + 341.19 * S_{11} + 377.32 * S_{12} + 628.9 * S_{13} + 696.67 * S_{14})$$

• **Restricciones:**

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec30. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec31. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec32. \quad (1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * S_{13} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)$$

- **Variables:**

$S_1 =$ superficie en hectáreas de cebada, regadio de red eléctrica

$S_2 =$ superficie en hectáreas de cebada, secano

$S_3 =$ superficie en hectáreas de trigo, regadio de red eléctrica

$S_4 =$ superficie en hectáreas de trigo, secano

$S_5 =$ superficie en hectáreas de girasol, regadio de red eléctrica

$S_6 =$ superficie en hectáreas de girasol, secano

$S_7 =$ superficie en hectáreas de cártamo, regadio de red eléctrica

$S_8 =$ superficie en hectáreas de cártamo, secano

$S_9 =$ superficie en hectáreas de remolacha, regadio de red eléctrica

$S_{10} =$ superficie en hectáreas de cebada, regadio de energía solar

$S_{11} =$ superficie en hectáreas de trigo, regadio de energía solar

$S_{12} =$ superficie en hectáreas de girasol, regadio de energía solar

$S_{13} =$ superficie en hectáreas de cártamo, regadio de energía solar

$S_{14} =$ superficie en hectáreas de remolacha, regadio de energía solar

Contraste de hipótesis entre las hipótesis hechas.

En este apartado contrastamos cada una de las hipótesis establecidas en nuestro modelo matemático:

1. Con el objetivo de contrastar si existe consistencia en el impacto de la programación lineal en la rentabilidad global sin variaciones bruscas en las condiciones

climatológicas, hemos realizado un análisis de varianza de un factor (ANOVA), definiendo las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H0): No hay diferencias significativas en la rentabilidad global entre los diferentes años, lo que indica que la programación lineal ha tenido un impacto consistente.
- Hipótesis alternativa (H1): Existen diferencias significativas en la rentabilidad global entre los diferentes años, lo que indica que la programación lineal no ha tenido un impacto consistente.

Estos fueron los datos introducidos en Excel y los resultados obtenidos:

Rendimientos económicos por cultivo y campaña (€)				
Cultivo	2020	2021	2022	2023
Cártamo Secano	41600.00			
Cártamo Regadío (Energía de Red)	80487.00	81689.22	79474.50	79477.79
Cártamo Regadío (Energía Solar)	69894.79	68694.58	70903.32	73093.64
Girasol Secano		89122.75	111431.06	
Trigo Secano				45885.22

Tabla 15: Beneficios en € por cultivo y campaña, obtenidos por la ejecución del modelo matemático propuesto. Elaboración propia. (2024).

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
Columna 1		3	191981.794	63993.931	404164826.818
Columna 2		3	239506.544	79835.515	106904718.184
Columna 3		3	261808.877	87269.626	456197476.288
Columna 4		3	198456.638	66152.213	318252703.919

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1114361833.863	3.000	371453944.621	1.156	0.385	4.066
Dentro de los grupos	2571039450.418	8.000	321379931.302			
Total	3685401284.282	11.000				

Tabla 16 y 17: Resultados obtenidos del análisis de varianza de un factor. Elaboración propia. (2024).

Para analizar estos resultados utilizaremos el estadístico F y el valor p obtenido en la tabla 4.

-En lo que respecta al valor p, tomamos un nivel de significancia típico de 0.05 y obtuvimos un valor p de 0.385. Puesto que el valor p es mayor que el nivel de significancia, no tenemos suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.

- En lo que respecta al estadístico F, el valor umbral al nivel de significancia seleccionado es 4.066 y obtuvimos un estadístico F de 1.156. Puesto que el F crítico calculado es mayor que el F calculado, no rechazamos la hipótesis nula.

El resultado obtenido en este análisis de varianza de un factor sugiere que el impacto de la programación lineal en la rentabilidad global ha sido consistente en las ejecuciones realizadas para cada una de las campañas estudiadas. Esto podría indicar que el modelo de programación lineal implementado está funcionando de manera estable, sin grandes fluctuaciones en la rentabilidad anual de cada variedad de cultivo.

2. Para contrastar si existe una relación positiva entre la cantidad de agua aplicada para regar y la rentabilidad de los cultivos, comparamos la rentabilidad de los cultivos en función de la cantidad de agua aplicada. Para ello observamos las necesidades hídricas y los beneficios por ha por cultivos calculados con los históricos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

CEBADA			TRIGO		
AÑO	RENTABILIDAD (€/ha)	Necesidades hídricas m3/ha	AÑO	RENTABILIDAD (€/ha)	Necesidades hídricas m3/ha
2020	40.9352	0	2020	78.7579	0
	100.8441386	1885.63		181.195	2708.79
2021	34.42984	0	2021	65.67723	0
	79.96261	1932.59		126.37539	1932.59
2022	62.29376	0	2022	96.56462	0
	161.31184	1970.77		186.51126	1970.77
2023	43.9015	0	2023	88.2408	0
	150.1401	1804.86		107.11808	2689.28

CÁRTAMO			GIRASOL		
AÑO	RENTABILIDAD (€/ha)	Necesidades hídricas m3/ha	AÑO	RENTABILIDAD (€/ha)	Necesidades hídricas m3/ha
2020	200	0	2020	43.6668	0
	800	3028.88		265.16905	1898.78
2021	200	0	2021	171.3899	0
	800	3103.44		250.3099	1920.43
2022	200	0	2022	214.2905	0
	800	2968.93		358.0696	1943.36
2023	200	0	2023	33	0
	800	3295.74		203.95	1854.85

Tabla 18: Comparación por cultivos de la rentabilidad y necesidades hídricas por cultivos en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Como podemos comprobar, en todos los cultivos se verifica que la rentabilidad en € por ha es mayor si el cultivo se planta en régimen de regadío que en secano.

Además, realizaremos un análisis de regresión lineal para cada tipo de cultivo, empleando este modelo de regresión lineal simple:

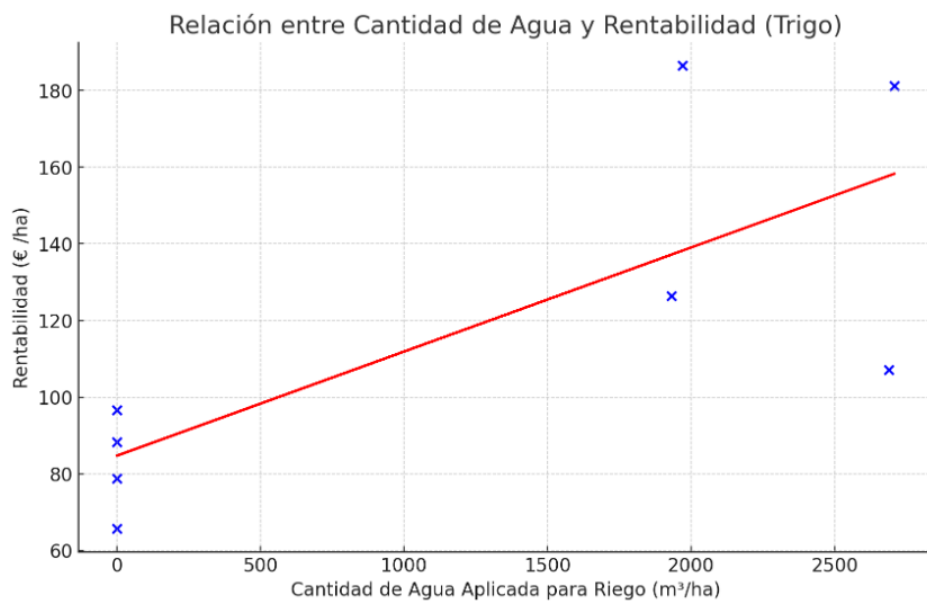
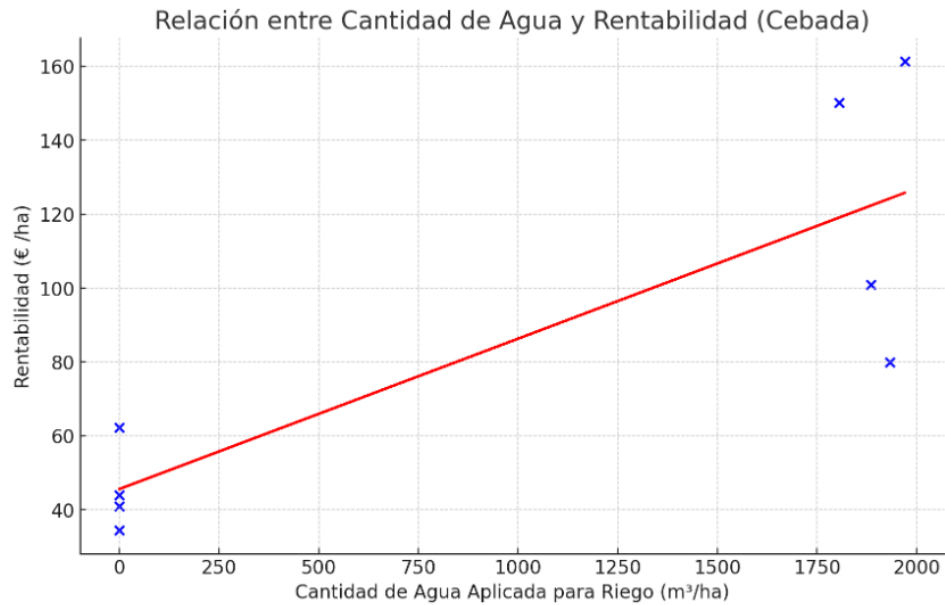
Ec33.
$$\text{Rentabilidad} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Riego} + \epsilon$$

Sabiendo que:

- Rentabilidad: variable dependiente (en euros por hectárea).
- Riego: variable independiente (en metros cúbicos por hectárea).
- β_0 : intercepto del modelo (la rentabilidad esperada cuando no se aplica agua).

- β_1 : coeficiente de la pendiente del modelo (el cambio en la rentabilidad por unidad de cambio en la cantidad de agua aplicada).
- ϵ : término de error del modelo (captura las variaciones en la rentabilidad no explicadas por la cantidad de agua aplicada).

Empleando Python para implementar este análisis obtenemos las siguientes gráficas:



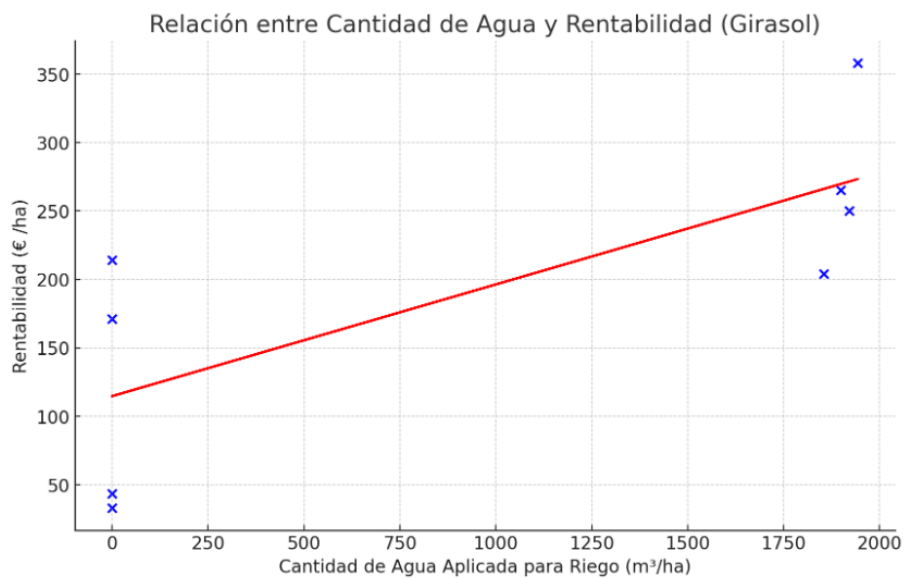
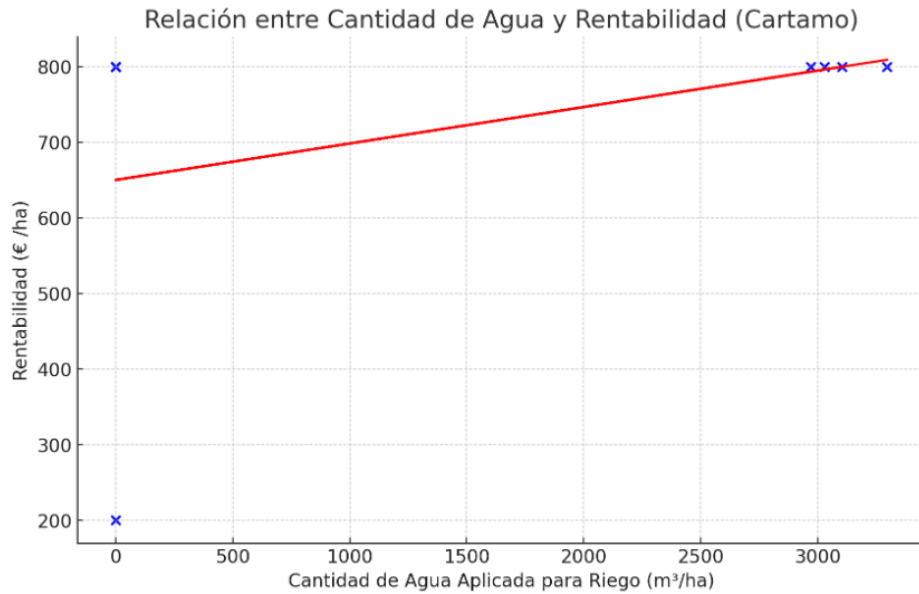


Figura 12: Gráficas que muestran la relación entre la cantidad de agua y rentabilidad.
Elaboración propia. (2024).

También obtuvimos los siguientes resultados:

- Cebada: Un coeficiente del agua aplicada de 0.0407, un P-valor de 0.009 (significativo) y un R-cuadrado de 0.702
- Trigo: Un coeficiente del agua aplicada de 0.0816, un P-valor de 0.030 (significativo) y un R-cuadrado de 0.571

- Cártamo: Un coeficiente del agua aplicada de 0 (sin variabilidad), un P-valor de no aplicable (sin variabilidad) y un R-cuadrado no aplicable.
- Girasol: Un coeficiente del agua aplicada de 0.1221, un P-valor de 0.037 (significativo) y un R-cuadrado de 0.537

Estos resultados nos permiten afirmar que hay una relación positiva y significativa entre la cantidad de agua aplicada para riego y rentabilidad, en los cultivos de cebada, trigo y girasol. Un mayor riego puede implicar una mayor rentabilidad.

En el caso del cártamo, no podríamos emplear un análisis de regresión lineal puesto que la falta de variación en la rentabilidad no permite establecer una relación entre variables. Sin embargo, analizando la Tabla 4, podemos ver como el cártamo de regadío tiene una mayor rentabilidad que el cártamo de secano.

3. Se ha postulado la hipótesis de que la implementación de la energía solar tendrá un efecto positivo al incrementar la rentabilidad. Para contrastar si esto se cumple hemos realizado una prueba t para las medias de dos muestras emparejadas. En esta prueba hemos tomado los beneficios en € por ha para cada tipo de cultivo, estableciendo una comparativa entre las rentabilidades de los cultivos regados a través de energía de la red eléctrica y aquellos regados a través de energía solar. Hemos definido las siguientes hipótesis:
 - Hipótesis nula (H0): El empleo de la energía solar como suministro eléctrico para el riego agrícola no tiene un impacto significativo en la rentabilidad de los cultivos.
 - Hipótesis alternativa (H1): El empleo de la energía solar como suministro eléctrico para el riego agrícola tiene un impacto significativo en la rentabilidad de los cultivos.

Estos fueron los datos introducidos en Excel y los resultados obtenidos:

TRIGO			CEBADA		
AÑO	ENERGÍA DE RED	ENERGÍA SOLAR	AÑO	ENERGÍA DE RED	ENERGÍA SOLAR
2020	181.20	341.19	2020	100.84	212.22
2021	126.38	290.93	2021	79.96	194.11
2022	186.51	355.97	2022	161.31	277.72
2023	107.12	265.96	2023	150.14	256.74

REMOLACHA			GIRASOL		
AÑO	ENERGÍA DE RED	ENERGÍA SOLAR	AÑO	ENERGÍA DE RED	ENERGÍA SOLAR
2020	346.67	696.67	2020	265.17	377.32
2021	183.78	537.41	2021	250.31	363.74
2022	302.00	658.98	2022	358.07	472.85
2023	296.80	644.09	2023	203.95	313.51

CÁRTAMO		
AÑO	ENERGÍA DE RED	ENERGÍA SOLAR
2020	450.00	628.90
2021	450.00	633.30
2022	450.00	625.36
2023	450.00	644.66

Tabla 19, 20, 21, 22 y 23: Beneficios en €/ha por cultivo y campaña obtenidos de los datos históricos de las campañas 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

TRIGO			GIRASOL		
	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	
Media	150.300	313.511	269.375	381.855	
Varianza	1567.607	1779.932	4176.110	4433.682	
Observaciones	4.000	4.000	4.000	4.000	
Coefficiente de correlación de Pearson	0.995		1.000		
Diferencia hipotética de las medias	0.000		0.000		
Grados de libertad	3.000		3.000		
Estadístico t	-67.465		-101.053		
P(T<=t) una cola	0.00000359		0.00000107		
Valor crítico de t (una cola)	2.353		2.353		
P(T<=t) dos colas	0.00000718		0.00000214		
Valor crítico de t (dos colas)	3.182		3.182		

CÁRTAMO			REMOLACHA		
	Variable 1	Variable 2		Variable 1	Variable 2
Media	450.000	633.057	Media	282.314	634.288
Varianza	0.000	70.426	Varianza	4815.870	4661.253
Observaciones	4.000	4.000	Observaciones	4.000	4.000
Coefficiente de correlación de Pearson	#¡DIV/0!		Coefficiente de correlación de Pearson	0.998	
Diferencia hipotética de las medias	0.000		Diferencia hipotética de las medias	0.000	
Grados de libertad	3.000		Grados de libertad	3.000	
Estadístico t	-43.626		Estadístico t	-166.510	
P(T<=t) una cola	0.00001325		P(T<=t) una cola	0.00000024	
Valor crítico de t (una cola)	2.353		Valor crítico de t (una cola)	2.353	
P(T<=t) dos colas	0.00002651		P(T<=t) dos colas	0.00000048	
Valor crítico de t (dos colas)	3.182		Valor crítico de t (dos colas)	3.182	

CEBADA		
	Variable 1	Variable 2
Media	123.065	235.197
Varianza	1515.822	1496.047
Observaciones	4.000	4.000
Coefficiente de correlación de Pearson	0.994	
Diferencia hipotética de las medias	0.000	
Grados de libertad	3.000	
Estadístico t	-53.134	
P(T<=t) una cola	0.00000734	
Valor crítico de t (una cola)	2.353	
P(T<=t) dos colas	0.00001468	
Valor crítico de t (dos colas)	3.182	

Tabla 24, 25, 26, 27 y 28: Resultados obtenidos de la prueba t para las medias de dos muestras. Elaboración propia. (2024).

Como podemos observar, en los cinco cultivos se cumple que el valor p obtenido (mostrados en las Tablas 5,6 y 7 como P(T<=t) dos colas) es mucho más pequeño que el nivel de significancia típico elegido de 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que el empleo de la energía solar para el riego agrícola tiene un impacto significativo en la rentabilidad de cada cultivo.

4. Para contrastar si tenemos una infraestructura de riego y una generación solar con suficiente potencia para implementar los resultados obtenidos, hemos analizado las necesidades hídricas que tendría mensualmente este plan de cultivos según su ciclo vegetativo.

Resultado del modelo			
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14
2021	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47
2022	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.61
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38
2023	SECANO	TRIGO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38

Tabla 29: Plan de cultivos en hectáreas eléctrica que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Obsérvese como el cártamo es el único cultivo de regadío que obtuvimos ejecutando el modelo para optimizar la rentabilidad económica. Es por ello que he tomado los datos históricos promedio de sus necesidades hídricas mensuales en metros cúbicos por hectárea. El ciclo vegetativo de este cultivo se caracteriza por iniciar su Establecimiento en marzo, su desarrollo vegetativo temprano en abril, su desarrollo vegetativo tardío en mayo, su floración en junio, su granación en julio y su maduración en agosto.

Registro de necesidades hídricas en m3/ha	
MES	RIEGO DE RED (m3/ha)
1	0.000
2	0.000
3	100.000
4	150.000
5	200.000
6	250.000
7	150.000
8	100.000
9	0.000
10	0.000
11	0.000
12	0.000

Tabla 30: Promedio de datos históricos sobre las necesidades hídricas mensuales en m3/ha. Elaboración propia. (2024).

La explotación agrícola cuenta con una infraestructura con una capacidad máxima para proveer mensualmente a todos los cultivos las siguientes cantidades de agua en metros cúbicos.

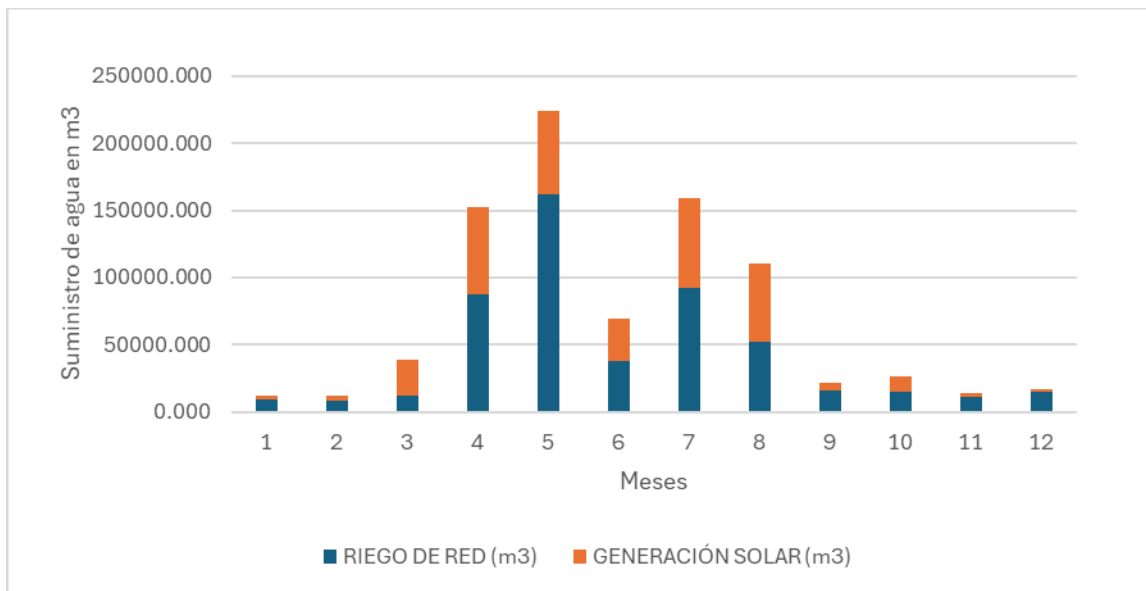


Figura 13: Suministro máximo de agua en m3 de la infraestructura. Elaboración propia. (2024).

Multiplicando la necesidad hídrica mensual promedio por hectárea por las hectáreas obtenidas tras ejecutar el modelo en cada campaña, obtendremos las necesidades hídricas en m3 totales mensuales del cártamo para cada campaña. En las siguientes tablas, las casillas verdes indican que la explotación agrícola es capaz de satisfacer las necesidades hídricas mensuales del cártamo para ese mes. Por el contrario, las casillas rojas indican que explotación no será capaz de ello.

2020-Registro de m3 de agua necesarios por mes			2021-Registro de m3 de agua necesarios por mes		
MES	RIEGO DE RED (m3)	GENERACIÓN SOLAR (m3)	MES	RIEGO DE RED (m3)	GENERACIÓN SOLAR (m3)
1	0.000	0.000	1	0.000	0.000
2	0.000	0.000	2	0.000	0.000
3	17886.000	11113.800	3	18153.160	10847.000
4	26829.000	16670.700	4	27229.740	16270.500
5	35772.000	22227.600	5	36306.320	21694.000
6	44715.000	27784.500	6	45382.900	27117.500
7	26829.000	16670.700	7	27229.740	16270.500
8	0.000	0.000	8	0.000	0.000
9	0.000	0.000	9	0.000	0.000
10	0.000	0.000	10	0.000	0.000
11	0.000	0.000	11	0.000	0.000
12	0.000	0.000	12	0.000	0.000

2022-Registro de m3 de agua necesarios por mes			2023-Registro de m3 de agua necesarios por mes		
MES	RIEGO DE RED (m3)	GENERACIÓN SOLAR (m3)	MES	RIEGO DE RED (m3)	GENERACIÓN SOLAR (m3)
1	0.000	0.000	1	0.000	0.000
2	0.000	0.000	2	0.000	0.000
3	17661.000	11338.000	3	17661.730	11338.270
4	26491.500	17007.000	4	26492.595	17007.405
5	35322.000	22676.000	5	35323.460	22676.540
6	44152.500	28345.000	6	44154.325	28345.675
7	26491.500	17007.000	7	26492.595	17007.405
8	0.000	0.000	8	0.000	0.000
9	0.000	0.000	9	0.000	0.000
10	0.000	0.000	10	0.000	0.000
11	0.000	0.000	11	0.000	0.000
12	0.000	0.000	12	0.000	0.000

Tabla 31, 32, 33 y 34: Necesidades hídricas totales y mensuales en m³ del cártamo para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Como podemos observar en los meses de Marzo y Junio en las cuatro campañas se sobrepasa la cantidad de agua en metros cúbicos que la explotación agrícola puede suministrar. Al tratarse del riego cuya energía proviene de la red eléctrica, se podría incrementar la potencia contratada para cubrir esta carencia. Es por ello que el plan de cultivos obtenido sigue siendo factible si se realiza esta modificación, aunque teniendo en cuenta cómo este suministro eléctrico adicional encarecía levemente el coste final de todos los cultivos.

Conclusión de la definición del modelo y del planteamiento de hipótesis

En este capítulo, hemos implementado el modelo matemático basado en la programación lineal para maximizar la rentabilidad económica de nuestra explotación agrícola. Utilizando datos históricos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, establecimos la función objetivo y las restricciones pertinentes, asegurando que el modelo se ajuste a las condiciones específicas de la explotación.

Los contrastes de hipótesis realizados han confirmado la consistencia del modelo, mostrando que la programación lineal puede mejorar significativamente la rentabilidad al optimizar el uso de recursos hídricos y energéticos. En particular, el uso de energía solar para el riego ha demostrado aumentar la rentabilidad de los cultivos con mayores necesidades hídricas como la remolacha.

Este apartado es crucial para el conjunto del proyecto al establecer las bases metodológicas necesarias para la optimización de nuestros cultivos. Proporciona un marco robusto para la toma de decisiones informadas sobre la gestión de recursos, lo que será fundamental en los próximos capítulos, donde se analizarán los resultados, se evaluará el impacto económico, se implementarán herramientas de gestión de riesgos, y se analizará su retorno y riesgo.

5. _Análisis de resultados:

En el capítulo anterior, hemos implementado nuestro modelo matemático utilizando los datos históricos de nuestra explotación agrícola. Este modelo ha sido contrastado bajo diferentes hipótesis y escenarios, estableciendo una base sólida para el análisis detallado que llevaremos a cabo en este capítulo.

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos al ejecutar el modelo base en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Además, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en las variables clave afectan la rentabilidad y sostenibilidad del modelo. Lo que nos permite identificar los cultivos con mayor sensibilidad ante las fluctuaciones de ciertas variables, algo a tener en cuenta a la hora de crear un plan de cultivos.

Este análisis es crucial para validar la robustez del modelo y su aplicabilidad en diferentes escenarios. Además, sirve de base para los siguientes capítulos, donde realizaremos un análisis económico detallado, y evaluaremos los riesgos y retornos asociados a nuestras decisiones.

Resultados del caso base.

Tras ejecutar nuestro modelo matemático en Matlab, obtuvimos el siguiente plan de cultivos en hectáreas para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Éste nos hubiera proporcionado la máxima rentabilidad económicas en cada una de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Podemos ver como el cultivo del cártamo presenta la mayor rentabilidad tanto para la superficie de regadío suministrada con energía de la red, como para superficie de regadío suministrada con energía solar. Por otro lado, en la superficie de secano no tenemos un cultivo con una rentabilidad predominante; en la campaña de 2020 fue el cártamo, en las campañas de 2021 y 2022 fue el girasol, y en las campañas de 2023 fue el trigo. En el siguiente capítulo entraremos a analizar en términos económicos estos resultados.

HECTÁREAS POR CULTIVO									
RED ELÉCTRICA									
AÑO	CEBADA REGADIO	CEBADA SECANO	TRIGO REGADIO	TRIGO SECANO	GIRASOL REGADIO	GIRASOL SECANO	CÁRTAMO REGADIO	CÁRTAMO SECANO	REMOLACHA
2020	0	0	0	0	0	0	178.86	520	0
2021	0	0	0	0	0	520	181.5316	0	0
2022	0	0	0	0	0	520	176.61	0	0
2023	0	0	0	520	0	0	176.6173	0	0

Tabla 35: Plan de cultivos en hectáreas regadas a través de la red eléctrica que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

HECTÁREAS POR CULTIVO					
ENERGÍA SOLAR					
AÑO	CEBADA REGADIO	TRIGO REGADIO	GIRASOL REGADIO	CÁRTAMO REGADIO	REMOLACHA
2020	0	0	0	111.138	0
2021	0	0	0	108.47	0
2022	0	0	0	113.38	0
2023	0	0	0	113.3827	0

Tabla 36: Plan de cultivos en hectáreas regadas a través de energía solar que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

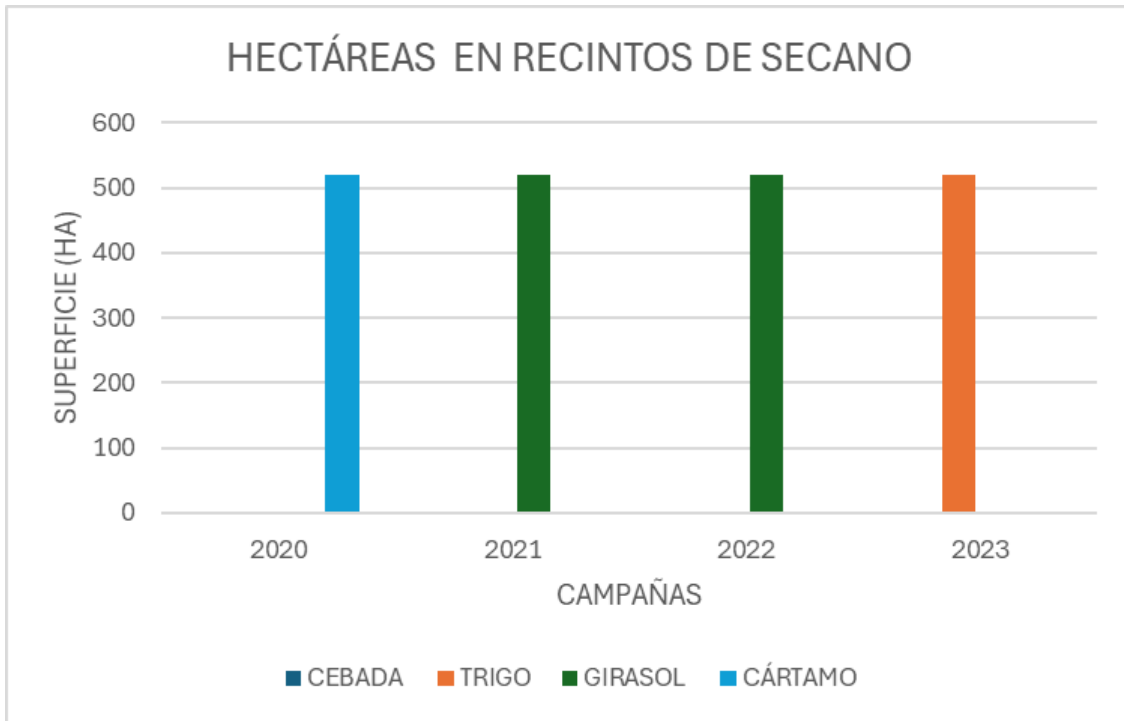


Figura 14: Hectáreas de secano que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

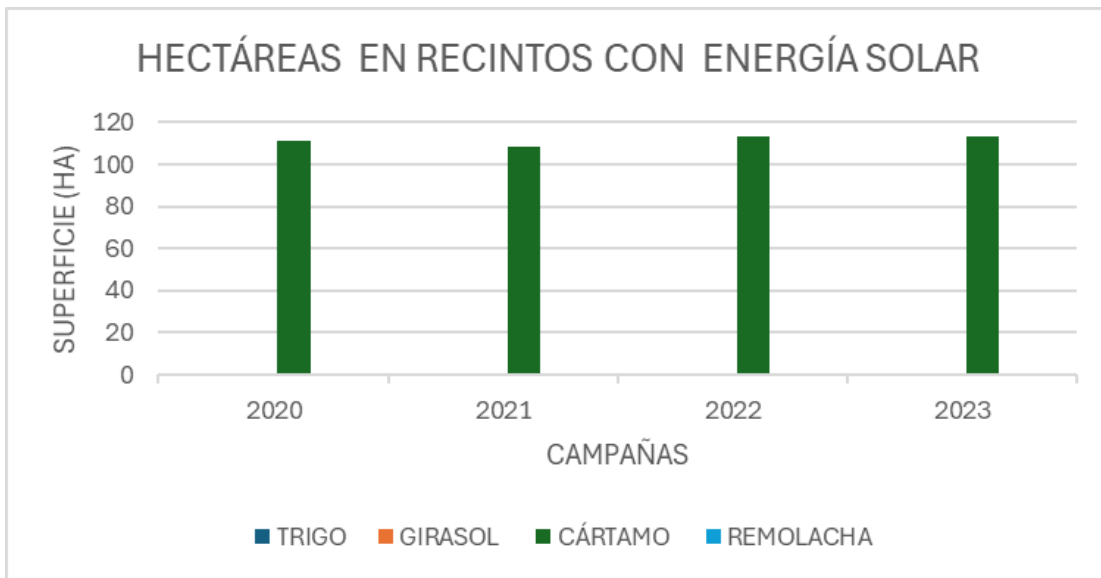


Figura 15: Hectáreas regadas a través de la red eléctrica que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

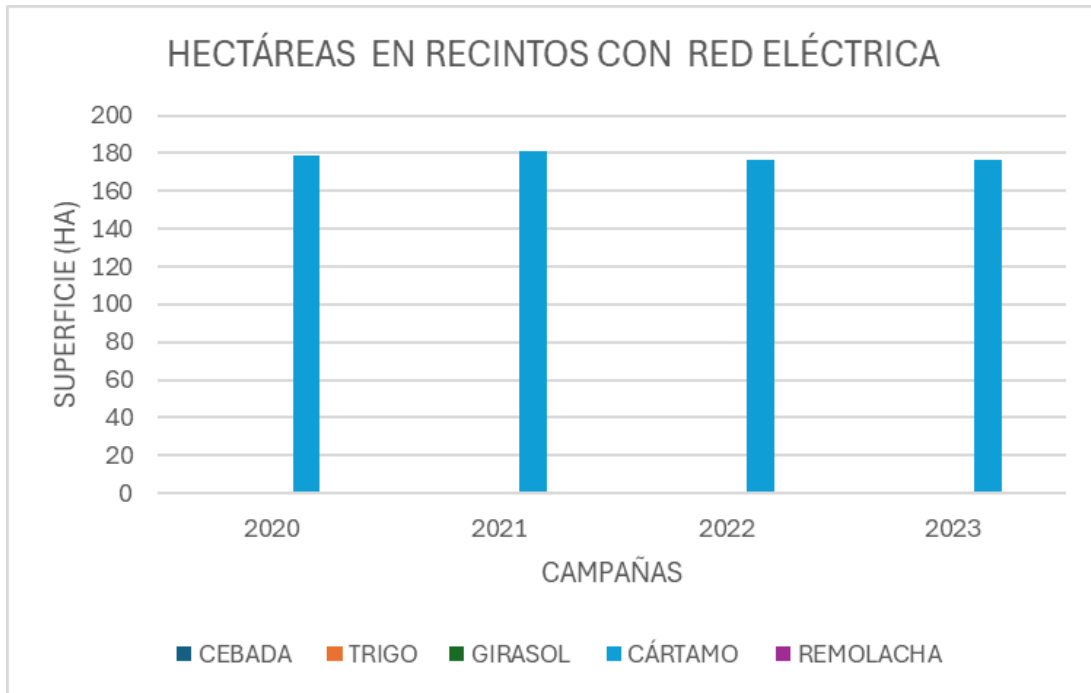


Figura 16: Hectáreas regadas a través de energía solar que maximiza la rentabilidad económica en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Análisis de sensibilidad

Con el propósito de evaluar la robustez del plan de cultivos propuestos, en este apartado voy a realizar un análisis de sensibilidad, ajustando varias de las variables críticas en nuestro modelo matemático como precios de los cultivos, costos de producción o disponibilidad de agua. Para ello, seguiremos los siguientes pasos:

1. Identificación de las variables clave:

Estas son las variables que afectan significativamente nuestro modelo matemático:

- Precios de los cultivos: Fluctuaciones en los precios de venta de los productos agrícolas.
- Producciones agrícolas: Variaciones en las producciones obtenidas.
- Costos de producción: Cambios en los costos de insumos como semillas, fertilizantes, agroquímicos, mano de obra o electricidad.
- Necesidades hídricas: Variaciones en la cantidad de agua requerida por cada cultivo.

2. Definición de los escenarios de análisis:

Estableceremos varios escenarios posibles para cada variable clave:

- Precios de los cultivos:
 - Escenario optimista: Aumento del 10 % en los precios.
 - Escenario pesimista: Reducción del 10 % en los precios.
 - Caso base: Precios históricos.
- Producciones agrícolas:
 - Escenario optimista: Aumento del 10 % en las producciones.
 - Escenario pesimista: Reducción del 10 % en las producciones.
 - Caso base: Producciones históricas.
- Costos de producción:
 - Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los costos.
 - Escenario optimista: Reducción del 10 % en los costos.
 - Caso base: Costos históricos.
- Necesidades hídricas:
 - Escenario pesimista: Aumento del 10 % en la disponibilidad de agua.
 - Escenario optimista: Reducción del 10 % en la disponibilidad de agua.
 - Caso base: Cantidad de agua requerida registrada en los históricos.

3. Ejecución de escenario:

Implementaremos el modelo matemático en Matlab para cada uno de los escenarios previamente definidos. Esto nos permitirá evaluar como estas modificaciones en las variables determinantes afectan a la rentabilidad económica del plan de cultivos. Podremos identificar qué cultivos han cambiado en respuesta a cada variable

En el Anexo 3, explico el desarrollo de los modelos matemáticos implementados para cada escenario y los datos utilizados.

4. Análisis de resultados:

El análisis de resultados es crucial para identificar las estrategias más efectivas y ajustar el modelo según las necesidades de la explotación. La relevancia de esta sección radica en proporcionar evidencia empírica para apoyar las recomendaciones del proyecto.

Estos fueron las soluciones obtenidas tras ejecutar el modelo en cada escenario:

- **Caso Base:** Empleando los precios, costes, necesidades hídricas y producciones que figuran en los datos históricos de las campañas de 2020, 2021, 2022, y 2023.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00	104000.00	62400.00	41600.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86	143088.00	62601.00	80487.00	541745.48
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14	88910.40	19015.61	69894.79	336623.67
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	197600.00	89122.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	145225.28	63536.06	81689.22	563372.43
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	86776.00	18081.42	68694.58	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	291200.00	111431.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.61	141288.00	61813.50	79474.50	524342.73
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90704.00	19800.68	70903.32	336617.28
2023	SECANO	TRIGO	520.00	254925.22	209040.00	45885.22	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62	141293.84	61816.06	79477.79	582084.70
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90706.16	17612.52	73093.64	373679.90

Tabla 37: Resultados obtenidos para cada cultivo seleccionado tras optimizar los beneficios de la explotación de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

- **Precios de los cultivos:**

En este apartado debemos hacer un paréntesis en el cultivo del cártamo, al no estar ligado a los precios del mercado, sino que supone un ingreso fijado contractualmente por hectárea. Es por ello que para ejecutar el modelo en el escenario optimista hemos decidido incrementar un 10% dicho ingreso, llegando a los 880 € por hectárea de regadío y 220 € por hectárea de secano. Mientras que, en el escenario pesimista, hemos disminuido un 10% dicho ingreso, bajando hasta los 720 € por hectárea de regadío y los 180 € por hectárea de secano.

En estos diagramas polares podemos ver como estas fluctuaciones de más menos 10% en los precios, afectan a los beneficios en euros por hectárea de cada cultivo para cada categoría de superficie. Para su elaboración se empleó el promedio de los beneficios de cada cultivo según su tipología de recinto de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

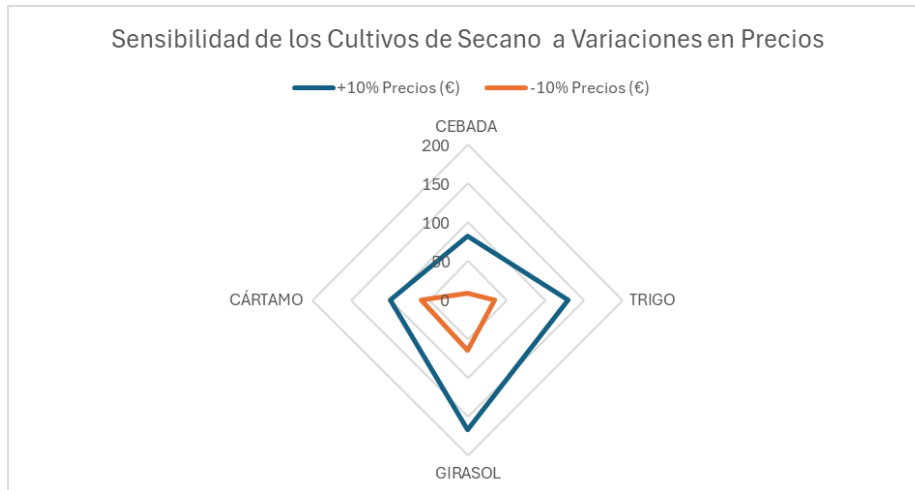


Figura 17: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones de sus precios en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

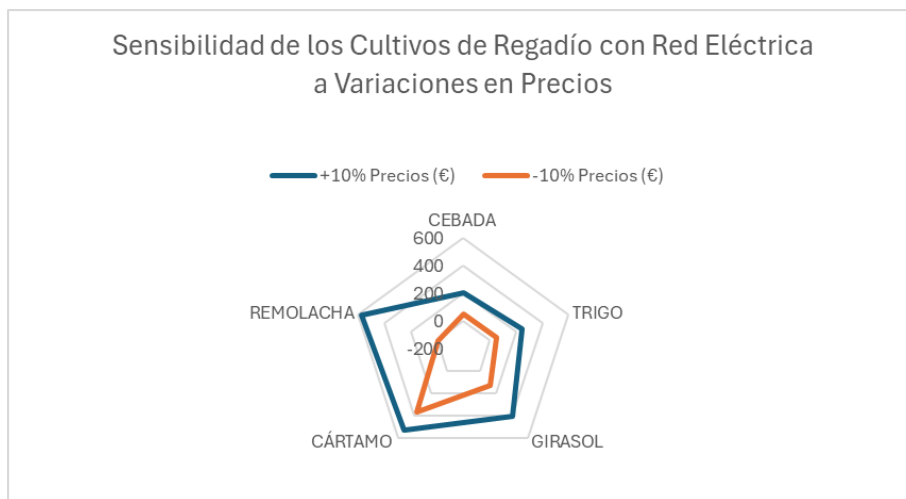


Figura 18: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones de sus precios en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

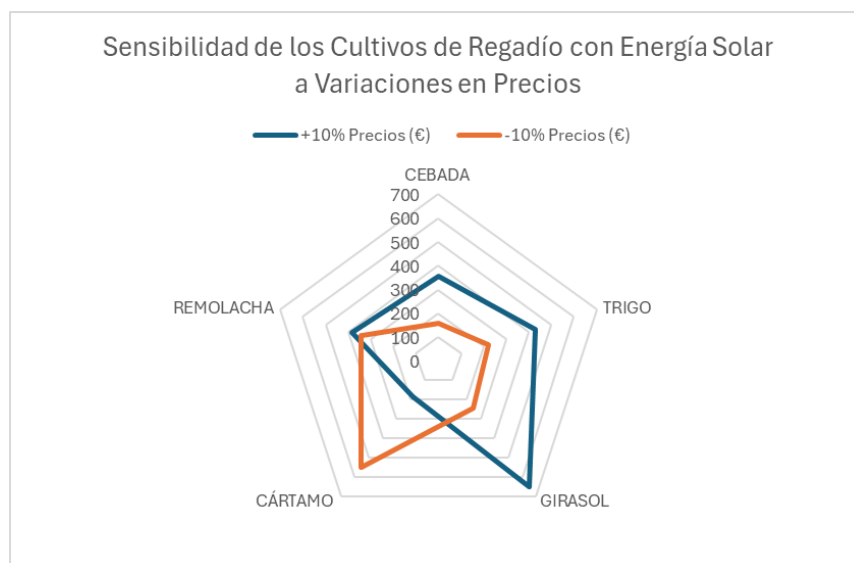


Figura 19: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones de sus precios en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

- Escenario optimista: Aumento del 10 % en los precios.

Precios de los cultivos							
Escenario optimista: Aumento del 10 % en los precios.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	TRIGO	520.00	191355.68	133005.60	58350.08	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	233.19	629389.07	491331.33	138057.74	1381806.99
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.80	153305.46	99797.60	53507.86	336578.06
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	315395.02	197600.00	117795.02	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	159746.40	63535.50	96210.90	563367.46
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	95453.60	18081.42	77372.18	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	442894.17	291200.00	151694.17	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	234.30	849735.81	701728.50	148007.31	1416083.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	55.69	201970.92	146911.19	55059.74	336584.23
2023	SECANO	TRIGO	520.00	280417.74	209040.00	71377.74	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	232.75	767511.41	628657.75	138853.66	1368530.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	57.25	188786.37	134749.76	54036.62	336620.27

Tabla 38: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en los precios de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

- Escenario pesimista: Reducción del 10 % en los precios.

Precios de los cultivos							
Escenario pesimista: Reducción del 10 % en los precios.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00	93600.00	62400.00	31200.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86	128779.20	62601.00	66178.20	541745.48
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14	80020.80	19015.95	61004.85	336629.72
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	258050.47	197600.00	60450.47	998623.60
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	130701.60	63535.50	67166.10	563367.46
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	78098.40	18081.42	60016.98	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	362367.95	291200.00	71167.95	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62	127166.40	61817.00	65349.40	524372.42
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	81633.60	19800.68	61832.92	336617.28
2023	SECANO	CÁRTAMO	520.00	93600.00	62400.00	31200.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	187.86	135259.20	65751.00	69508.20	619137.72
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	102.14	73540.80	15866.12	57674.68	336626.88

Tabla 39: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en los precios de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Estos resultados muestran como para los recintos de regadío el cultivo más rentable si los precios se mantienen o se reducen un 10 % respecto al caso base es el cártamo, mientras que si los precios aumentan un 10% respecto al caso base entonces es la remolacha (exceptuando la campaña de 2021). Analizando nuestro modelo matemático y los datos históricos empleados en su implementación podemos ver como el motivo de fondo de esta transición es la elevada necesidad hídrica del cultivo de la remolacha que supone un coste significativo. Es por ello que solo cuando los precios por tonelada de remolacha son elevados respecto al caso base, resulta un cultivo rentable pese a su costoso riego.

En lo que respecta a los recintos de secano podemos observar como en las campañas de 2021 y 2022, pese a los elevados costos que conlleva el cultivo del girasol, si su precio de mercado es elevado se convierte en el cultivo más rentable sin importar las pequeñas fluctuaciones de precio que puedan darse. Las campañas de 2020 y 2023 muestran como si todos los cultivos presentan unos precios de mercado estables, con pequeñas fluctuaciones de los precios al alza, el trigo se convierte en el cultivo más rentable, y con pequeñas fluctuaciones de precios a la baja, el cártamo se convierte en el cultivo más rentable. La explicación a este suceso se explica ya que el cultivo del trigo tiene un mayor costo por hectárea respecto al cártamo.

- **Producciones agrícolas:**

En este apartado también debemos hacer una aclaración respecto al cultivo del cártamo puesto que su ingreso fijo por hectárea fue pactado contractualmente con el distribuidor y no depende de las producciones agrícolas que obtengamos por hectárea. Manteniéndose en 800 € por hectárea de regadío y 200 € por hectárea de seco, independientemente al aumento o reducción de la producción agrícola por hectárea.

En estos diagramas polares podemos ver como estas fluctuaciones de más menos 10% en las producciones, afectan a los beneficios en euros por hectárea de cada cultivo para cada categoría de superficie. Para su elaboración se empleó el promedio de los beneficios de cada cultivo según su tipología de recinto de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

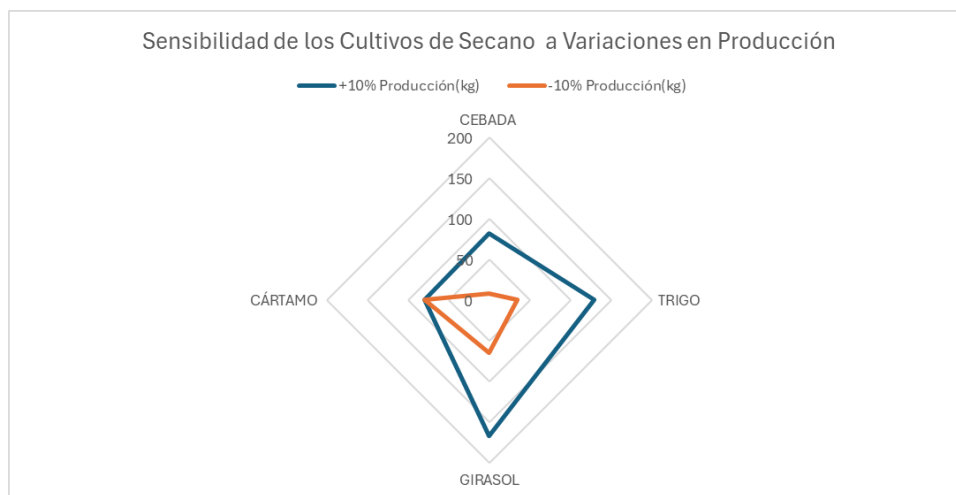


Figura 20: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones en su producción en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

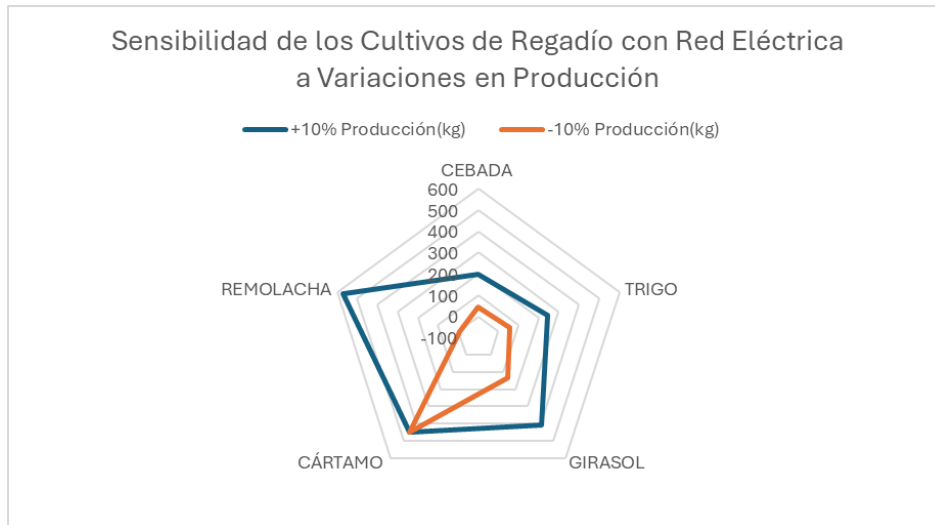


Figura 21: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones en su producción en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

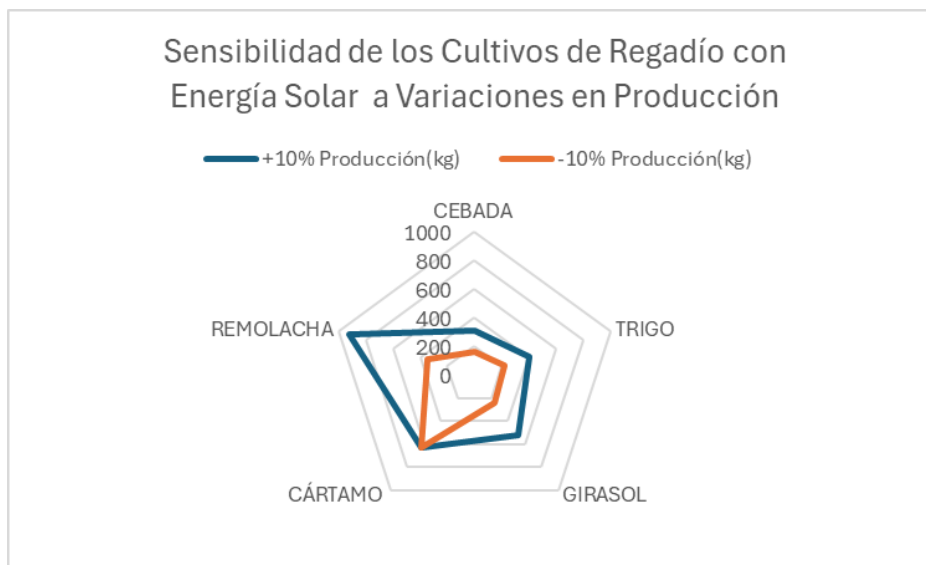


Figura 22: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones en su producción en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

- Escenario optimista: Aumento del 10 % en las producciones.

Producciones de los cultivos							
Escenario optimista: Aumento del 10 % en la producción.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	TRIGO	520.00	191355.68	133005.60	58350.08	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	233.19	629389.07	491331.33	138057.74	199842841.62
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.80	153305.46	269357686.12	53507.86	48677359.25
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	315395.02	197600.00	117795.02	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	233.77	738727.67	628607.53	110120.14	1399583.33
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.23	177690.28	131318.25	46372.03	336649.57
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	442894.17	291200.00	151694.17	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	234.30	849735.81	701728.50	148007.31	1416083.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	55.69	201970.92	146911.19	55059.74	336584.23
2023	SECANO	TRIGO	520.00	280417.74	209040.00	71377.74	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	232.75	767511.41	628657.75	138853.66	1368530.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	57.25	188786.37	134749.76	54036.62	336620.27

Tabla 40: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en las producciones agrícolas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

- Escenario pesimista: Reducción del 10 % en las producciones.

Producciones de los cultivos							
Escenario pesimista: Reducción del 10 % en la producción.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00	416000.00	182000.00	234000.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86	35772.00	21463.20	14308.80	541745.48
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14	88912.00	19015.95	69896.05	336629.72
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	258050.47	197600.00	60450.47	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	145224.00	63535.50	81688.50	563367.46
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	86776.00	18081.42	68694.58	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	362367.95	291200.00	71167.95	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62	141296.00	61817.00	79479.00	524372.42
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90704.00	19800.68	70903.32	336617.28
2023	SECANO	CÁRTAMO	520.00	104000.00	62400.00	41600.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	187.86	150288.00	65751.00	84537.00	619137.72
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	102.14	81712.00	15866.12	65845.88	336626.88

Tabla 41: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en las producciones agrícolas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

Estos resultados muestran como para los recintos de regadío el cultivo más rentable si las producciones agrícolas se mantienen o se reducen un 10 % respecto al caso base es el cártamo, mientras que si las producciones agrícolas aumentan un 10% respecto al caso base entonces es la remolacha (que suceda en todas las campañas determina que la rentabilidad de la remolacha es muy sensible a los incrementos en su producción). Analizando nuestro modelo matemático y los datos históricos empleados en su implementación podemos ver como el motivo de fondo de esta variación es la elevada necesidad hídrica del cultivo de la

remolacha que supone un coste significativo. Es por ello que solo cuando las producciones de remolacha son elevadas respecto al caso base, resulta un cultivo rentable pese a su costoso riego.

En lo que respecta a los recintos de secano podemos observar como en las campañas de 2021 y 2022, pese a los elevados costos que conlleva el cultivo del girasol, si sus producciones en toneladas son elevadas se convierte en el cultivo más rentable sin importar las pequeñas fluctuaciones de producción que puedan darse. Las campañas de 2020 y 2023 muestran como si todos los cultivos presentan unas producciones elevadas, con pequeñas fluctuaciones de la cantidad producida al alza, el trigo se convierte en el cultivo más rentable, y con pequeñas fluctuaciones de la cantidad producida a la baja, el cártamo se convierte en el cultivo más rentable. La explicación a este suceso se explica ya que el cultivo del trigo tiene un mayor costo por hectárea respecto al cártamo.

- **Costos de producción:**

En estos diagramas polares podemos ver como estas fluctuaciones de más menos 10% en los costes, afectan a los beneficios en euros por hectárea de cada cultivo para cada categoría de superficie. Para su elaboración se empleó el promedio de los beneficios de cada cultivo según su tipología de recinto de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

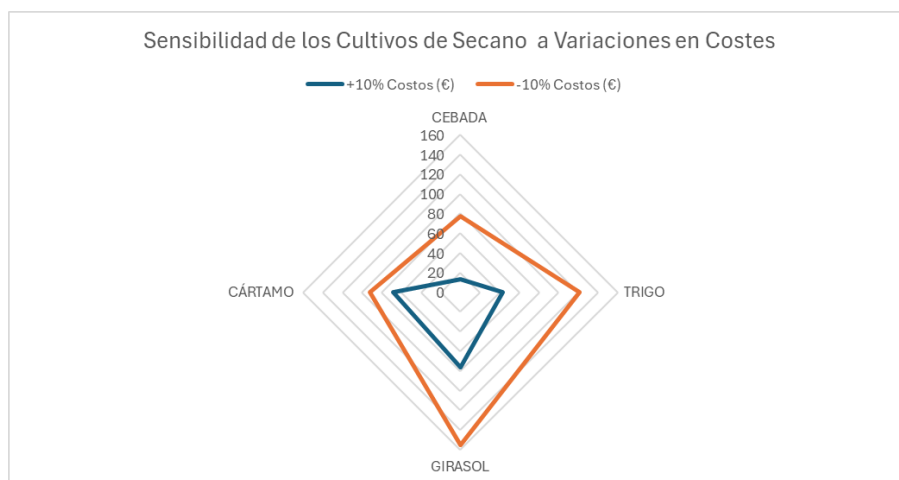


Figura 23: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones en su coste en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

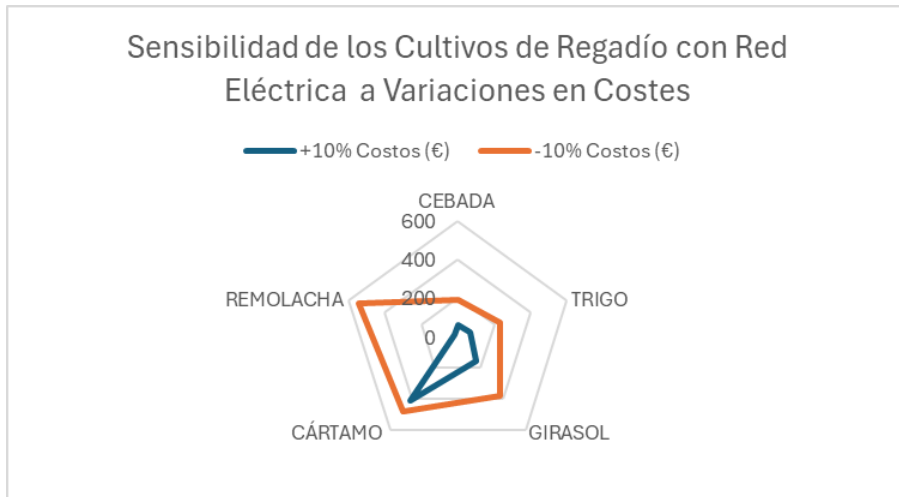


Figura 24: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones en su coste en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. *Elaboración propia. (2024).*

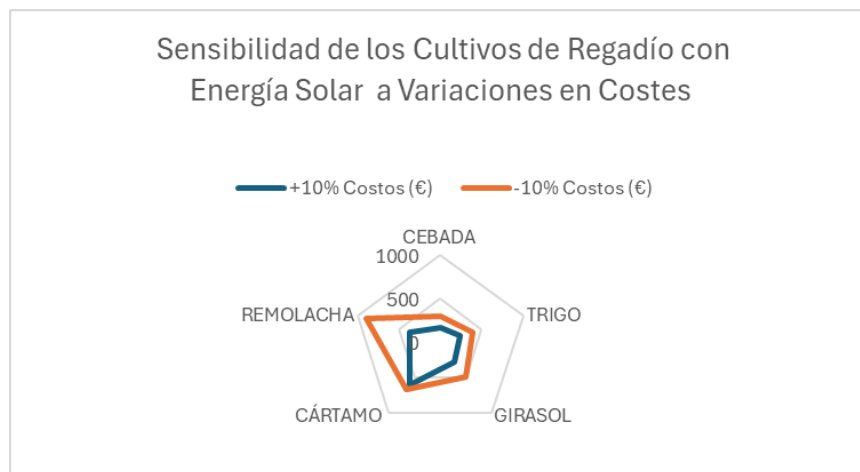


Figura 25: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones en su coste en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. *Elaboración propia. (2024).*

- Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los costos.

Costos de producción							
Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los costos.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00	104000.00	68640.00	35360.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86	143088.00	68861.10	74226.90	541745.48
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14	88912.00	22905.85	66006.15	336629.72
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	217360.00	69362.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	145224.00	69889.05	75334.95	563367.46
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	86776.00	21877.87	64898.13	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	320320.00	82311.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62	141296.00	67998.70	73297.30	110451.08
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90704.00	23768.98	66935.02	70903.32
2023	SECANO	CÁRTAMO	520.00	104000.00	68640.00	35360.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	187.86	150288.00	72326.10	77961.90	619137.72
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	102.14	81712.00	-19441.02	62270.98	336626.88

Tabla 42: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en los costos de producción de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

- Escenario optimista: Reducción del 10 % en los costos.

Costos de producción							
Escenario optimista: Reducción del 10 % en los costos.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	TRIGO	520.00	173959.71	119705.04	54254.67	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	233.19	572171.88	442198.20	129973.69	1381806.99
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.80	139368.60	87829.84	51538.76	336578.06
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	177840.00	108882.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	145224.00	57181.95	88042.05	563367.46
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	86776.00	14284.97	72491.03	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	262080.00	140551.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	234.30	772487.10	631555.65	140931.45	1416083.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	55.69	183609.93	130232.03	53377.90	336584.23
2023	SECANO	TRIGO	520.00	254925.22	188136.00	66789.22	0.00
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	232.75	697737.65	565791.98	131945.67	1368530.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	57.25	171623.98	119286.53	52337.44	336620.27

Tabla 43: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en los costos de producción de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Estos resultados reflejan como para los recintos de regadío el cultivo más rentable si los costes se reducen un 10 % respecto al caso base es la remolacha (exceptuando la campaña de 2021), mientras que si los costes se mantienen o aumentan un 10% respecto al caso base entonces es la remolacha. Analizando nuestro modelo matemático y los datos históricos empleados en su implementación podemos ver como el motivo de fondo de esta transición es la elevada necesidad hídrica del cultivo de la remolacha que supone un coste significativo.

Es por ello que solo cuando los costes por hectárea de remolacha son reducidos respecto al caso base, resulta un cultivo rentable.

En lo que respecta a los recintos de secano podemos observar como en las campañas de 2021 y 2022, pese a los elevados costos que conlleva el cultivo del girasol, si su precio de mercado es elevado se convierte en el cultivo más rentable sin importar las pequeñas fluctuaciones de los costes por hectárea que puedan darse. Las campañas de 2020 y 2023 muestran como si todos los cultivos presentan unos costos y precios de mercado estables, con pequeñas fluctuaciones de los costes al alza, el cártamo se convierte en el cultivo más rentable, y con pequeñas fluctuaciones de costes a la baja, el trigo se convierte en el cultivo más rentable. Esta variación se explica puesto que el trigo por lo general tiene un mayor costo por hectárea que el cártamo.

- Necesidades hídricas:

En estos diagramas polares podemos ver como estas fluctuaciones de más menos 10% en las necesidades hídricas, afectan a los beneficios en euros por hectárea de cada cultivo para cada categoría de superficie. Para su elaboración se empleó el promedio de los beneficios de cada cultivo según su tipología de recinto de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

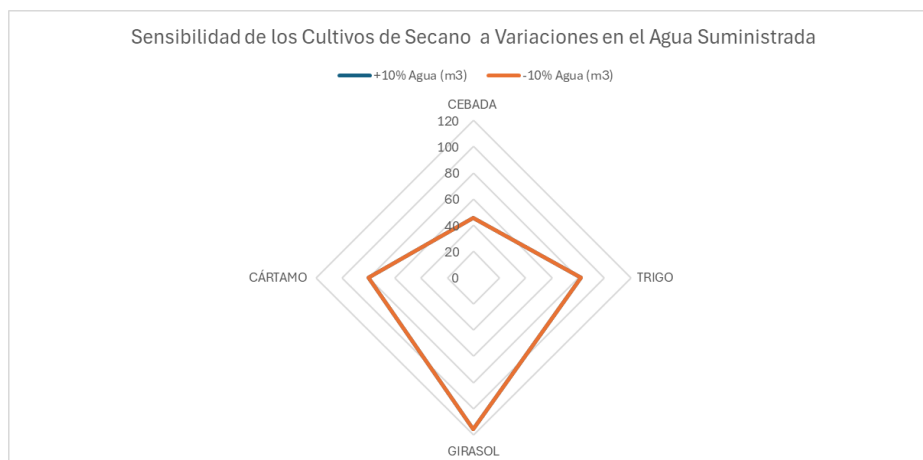


Figura 26: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de secano a las variaciones en su consumo hídrico en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

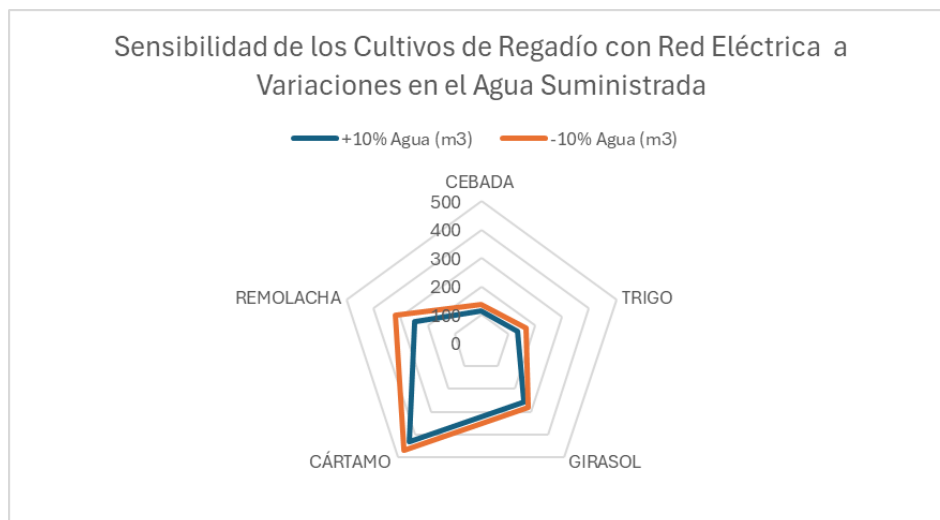


Figura 27: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con la red eléctrica a las variaciones en su consumo hídrico en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

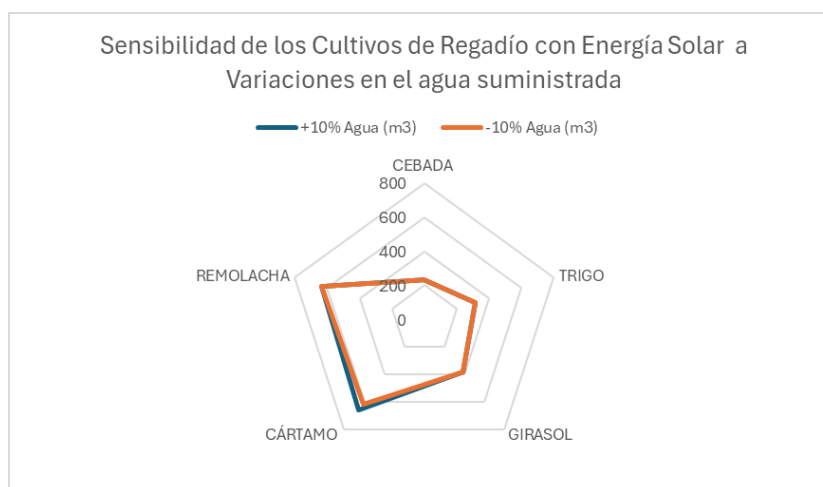


Figura 28: Diagrama Polar de la sensibilidad de la rentabilidad promedio de cada cultivo de regadío suministrado con energía solar a las variaciones en su consumo hídrico en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

- Escenario pesimista: Aumento del 10 % en las necesidades hídricas.

Necesidades hídricas							
Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los m ³ de agua suministrados.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CARTAMO	520.00	104000.00	62400.00	41600.00	0.00
	RED ELECTRICA	CARTAMO	188.98	151168.00	69516.51	81651.49	629570.88
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	101.04	80828.00	17286.99	63541.01	336625.18
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	197600.00	89122.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CARTAMO	191.39	153112.00	70494.77	82617.23	653364.12
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	98.61	78886.08	16915.09	62448.67	336625.05
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	291200.00	111431.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	CARTAMO	186.92	149536.00	68899.83	80836.17	610447.64
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	103.08	82464.00	18001.89	64462.11	336641.03
2023	SECANO	TRIGO	520.00	254925.22	209040.00	45885.22	0.00
	RED ELECTRICA	CARTAMO	197.15	157720.00	72840.28	84879.72	714730.66
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	102.14	81712.00	15866.12	65845.88	370289.57

Tabla 44: Resultados obtenidos tras un aumento del 10% en las necesidades hídricas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

- Escenario optimista: Reducción del 10 % en las necesidades hídricas.

Necesidades hídricas							
Escenario optimista: Reducción del 10 % en los m ³ de agua suministrados.							
AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CARTAMO	520.00	416000.00	172697.15	243302.85	0.00
	RED ELECTRICA	CARTAMO	166.51	33302.00	19981.20	13320.80	453904.93
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	123.49	98792.00	21129.02	77662.98	336632.75
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	197600.00	89122.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CARTAMO	169.48	135584.00	58211.35	79372.65	473373.91
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	120.52	96416.00	20090.10	76325.90	336623.93
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	291200.00	111431.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	CARTAMO	164.02	131216.00	54530.75	76685.25	438267.51
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	125.98	100784.00	22001.15	78782.85	336623.22
2023	SECANO	TRIGO	520.00	254925.22	209040.00	45885.22	0.00
	RED ELÉCTRICA	CARTAMO	176.51	141208.00	58342.50	82865.50	523557.96
	ENERGÍA SOLAR	CARTAMO	113.49	90792.00	17629.19	73162.81	336630.18

Tabla 45: Resultados obtenidos tras una reducción del 10% en las necesidades hídricas de todos los cultivos para las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Como podemos observar nuestra elección de cultivos por campaña es idéntica al caso base. Esto nos muestra que para un rango de más menos 10% de variación en las necesidades hídricas de nuestro cultivo, no tendríamos cambios en nuestro plan de cultivos. Definiendo nuestro modelo como poco sensible ante fluctuaciones de las necesidades hídricas de nuestros cultivos.

ALTA SENSIBILIDAD				
CULTIVOS DE REGADÍO				
	PRECIOS	PRODUCCIONES	COSTES	NECESIDADES HÍDRICAS
CEBADA				
TRIGO				
GIRASOL				
REMOLACHA	↑	↑	↓	
CÁRTAMO	≈↓	≈↓	≈↑	

Tabla 46: Resumen de los cultivos de regadío con una alta sensibilidad a variaciones de más menos 10% en cada variable. Elaboración propia. (2024).

ALTA SENSIBILIDAD				
CULTIVOS DE SECANO				
	PRECIOS	PRODUCCIONES	COSTES	NECESIDADES HÍDRICAS
CEBADA				
TRIGO	≈↑	≈↑	≈↓	
GIRASOL				
REMOLACHA				
CÁRTAMO	↓	↓	↑	

Tabla 47: Resumen de los cultivos de secano con una alta sensibilidad a variaciones de más menos 10% en cada variable. Elaboración propia. (2024).

Conclusión del análisis de resultados

En este capítulo, hemos mostrado los resultados obtenidos ejecutando el modelo matemático desarrollado y hemos realizado un análisis de sensibilidad de sus variables. Este último ha permitido identificar cómo las variaciones en las variables clave, como las necesidades hídricas y los precios de los cultivos, afectan a la optimización de los cultivos más rentables. Al implementar estas fluctuaciones en los datos históricos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, hemos observado el grado de sensibilidad de nuestros cultivos ante cada variable.

Los resultados del análisis de sensibilidad han mostrado que dentro de los recintos de regadío la rentabilidad de los cultivos de la remolacha y cártamo tiene una alta sensibilidad a las modificaciones en sus precios, costes y especialmente en su producción agrícola. El elevado

coste de regar el cultivo de la remolacha hace que solo se convierte en el cultivo más rentable si fluctúa al alza su precio o producción, y si se reducen sus costes. En contraste, en los recintos de secano es la rentabilidad de los cultivos del trigo y el cártamo, la que tiene una alta sensibilidad a las variaciones en sus precios, costes y producción agrícola. EL cultivo del trigo resulta más costoso que el cártamo, por lo que solo se convierte en el cultivo más rentable si fluctúa al alza su precio o producción, y si se reducen sus costos. Puntualmente se puede dar el caso de un cultivo cuyo precio por tonelada se incremente en un 50% o más, como ocurrió en las campañas de 2021 y 2022 con el cultivo de girasol en secano. Estas fuertes subidas pueden convertir a un cultivo en particular en el más rentable, sin verse afectadas por pequeñas fluctuaciones cercanas a un $\pm 10\%$ en sus precios, producción o costes.

Estas conclusiones son cruciales, ya que permiten ajustar nuestras estrategias de cultivo para maximizar la rentabilidad, incluyendo las posibles fluctuaciones de precios, producciones y costes que fije el mercado. En los siguientes capítulos, nos centraremos en el análisis económico detallado y la evaluación de riesgos y retornos. Este análisis económico nos permitirá comprender mejor el impacto financiero de las estrategias propuestas, mientras que la evaluación de riesgos ayudará a gestionar las incertidumbres asociadas a las decisiones de cultivo y riego.

6. Análisis económico:

En este capítulo evaluaremos el impacto económico del modelo propuesto, considerando su viabilidad económica a largo plazo y estableciendo una comparativa con los resultados esperados. Este apartado analiza cómo las decisiones sobre cultivos y riego afectan a la rentabilidad general de la explotación, proporcionando una visión clara de los beneficios económicos de las estrategias implementadas para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Además, este apartado incluye la elaboración de un plan de cultivos para las campañas de 2024 en adelante, capaz de integrar el modelo matemático propuesto y de actualizarse periódicamente ajustándose a los cambios en su entorno gracias a la creación de una etapa

transitoria. Se buscará obtener la máxima rentabilidad posible por campaña manteniendo una cierta rotación de cultivos y recuperación de macronutrientes con barbecho.

Impacto en nuestra explotación

Si analizamos como esta distribución de hectáreas afectaría al beneficio neto entonces obtendríamos los siguientes resultados:

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	SECANO	CÁRTAMO	520.00	104000.00	62400.00	41600.00	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	178.86	143088.00	62601.00	80487.00	541745.48
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	111.14	88910.40	19015.61	69894.79	336623.67
2021	SECANO	GIRASOL	520.00	286722.75	197600.00	89122.75	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	181.53	145225.28	63536.06	81689.22	563372.43
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.47	86776.00	18081.42	68694.58	336630.14
2022	SECANO	GIRASOL	520.00	402631.06	291200.00	111431.06	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.61	141288.00	61813.50	79474.50	524342.73
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90704.00	19800.68	70903.32	336617.28
2023	SECANO	TRIGO	520.00	254925.22	209040.00	45885.22	0.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	176.62	141293.84	61816.06	79477.79	582084.70
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	113.38	90706.16	17612.52	73093.64	373679.90

Tabla 48: Desglose económico del plan de cultivo propuesto para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

En primer lugar, comprobaremos si estos resultados se ajustan a los resultados esperados de acuerdo con lo estipulado en el tercer apéndice del Capítulo 3. Esperamos que tras ejecutar nuestro modelo matemático en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, obtengamos un beneficio neto total por campaña mayor que los resultados históricos registrados en dichas campañas. De cumplirse esta desigualdad, habríamos logrado crear una herramienta de gestión agrícola que mejorase la realidad de nuestra explotación al optimizar nuestros rendimientos. Por ello, extraeríamos información valiosa para estimar la rentabilidad que obtendremos en la campaña de 2024, y establecer planes de cultivo óptimos para las próximas campañas.

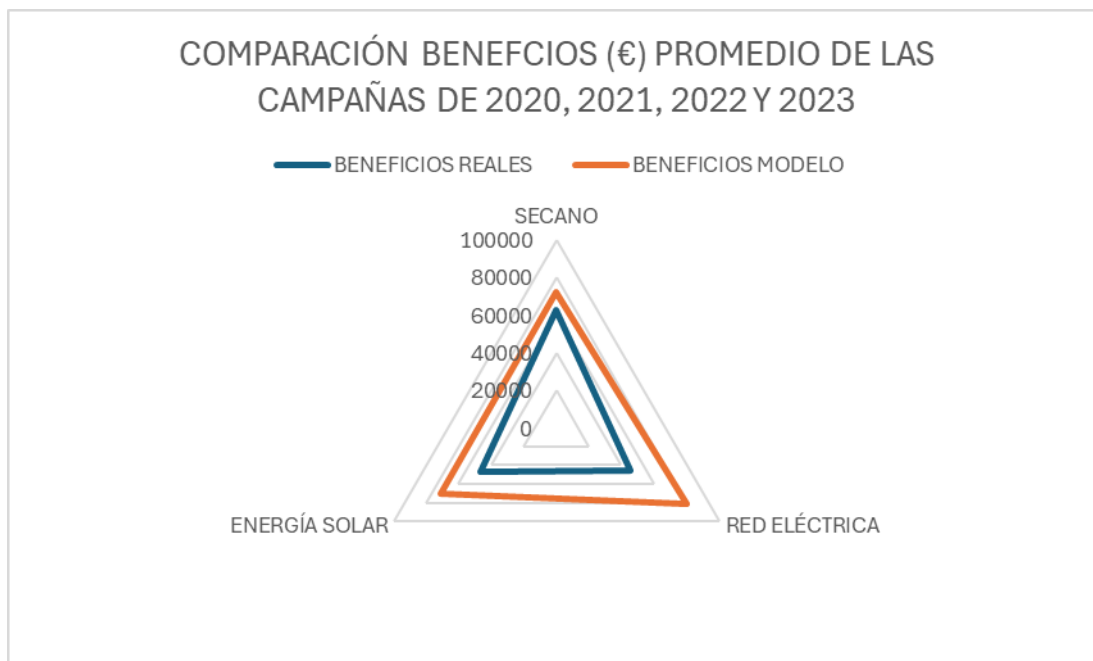


Figura 29: Diagrama Polar comparando los beneficios totales promedio de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Comparando los beneficios netos totales por campaña obtuvimos:

COMPARACIÓN BENEFICIOS NETOS TOTALES		
AÑO	BENEFICIOS REALES	BENEFICIOS MODELO
2020	124,768.52 €	191,981.79 €
2021	206,931.87 €	239,506.54 €
2022	167,646.61 €	261,808.88 €
2023	119,391.74 €	198,456.64 €

Tabla 49: Comparación de los beneficios netos totales reales y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Como podemos ver en la Tabla 18, en todas las campañas se verifica la siguiente desigualdad:

Ec34. $(B_{T_modelo} > B_{T_reales})$

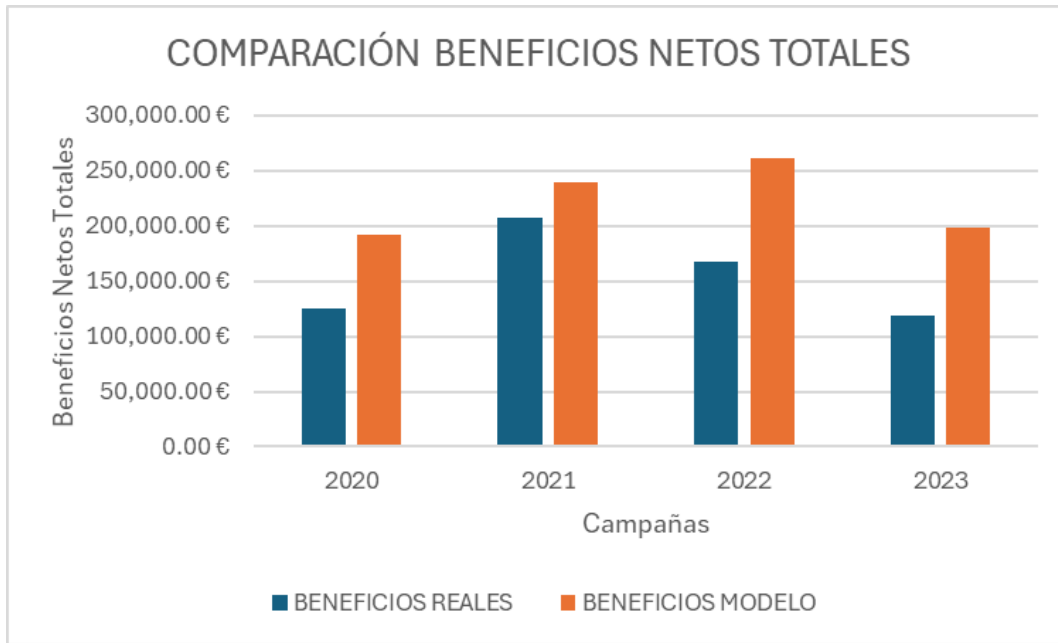


Figura 30: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Adicionalmente, para verificar la efectividad de los resultados del modelo en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, los hemos comparado también con el promedio de todos los cultivos calculado agrupándolos por cada tipología de superficie. Con ello se pretende evitar que el efecto de una casuística específica que pueda distorsionar las conclusiones extraídas, si por ejemplo se hubiera seleccionado una combinación de cultivos muy poco rentable en estas cuatro campañas. En el anexo 4 explico detalladamente cómo se han calculado estos resultados promedio esperados.

RESULTADOS PROMEDIO ESPERADOS				
AÑO	SUMINISTRO	BENEFICIO PROMEDIO (€/ha)	SUPERFICIE PROMEDIO (ha)	BENEFICIO PROMEDIO TOTAL (€)
2020	SECANO	60.84	520.00	31636.79
	RED ELÉCTRICA	268.78	181.04	48660.29
	ENERGÍA SOLAR	451.26	108.96	49167.56
2021	SECANO	87.87	520.00	45694.61
	RED ELÉCTRICA	218.09	182.99	39908.68
	ENERGÍA SOLAR	403.90	107.01	43219.12
2022	SECANO	113.29	520.00	58909.35
	RED ELÉCTRICA	291.58	183.45	53488.80
	ENERGÍA SOLAR	478.18	106.55	50951.75
2023	SECANO	61.29	520.00	31868.50
	RED ELÉCTRICA	241.60	181.58	43870.71
	ENERGÍA SOLAR	424.99	108.42	46076.47

Tabla 50: Resultados promedio esperados para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

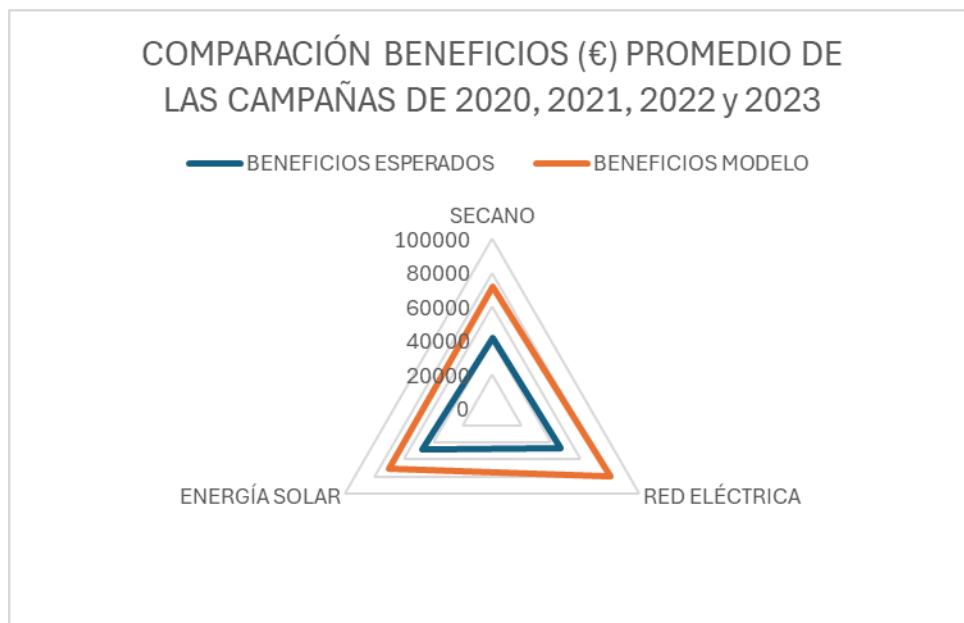


Figura 31: Diagrama Polar comparando los beneficios totales promedio de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Comparando los beneficios netos totales por campaña obtuvimos:

COMPARACIÓN BENEFICIOS NETOS TOTALES		
AÑO	BENEFICIOS ESPERADOS	BENEFICIOS MODELO
2020	129,464.65 €	191,981.79 €
2021	128,822.41 €	239,506.54 €
2022	163,349.91 €	261,808.88 €
2023	121,815.68 €	198,456.64 €

Tabla 51: Comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Como podemos ver en la Tabla 18, en todas las campañas se verifica la siguiente desigualdad:

Ec35. $(B_{T_modelo} > B_{T_promedio})$

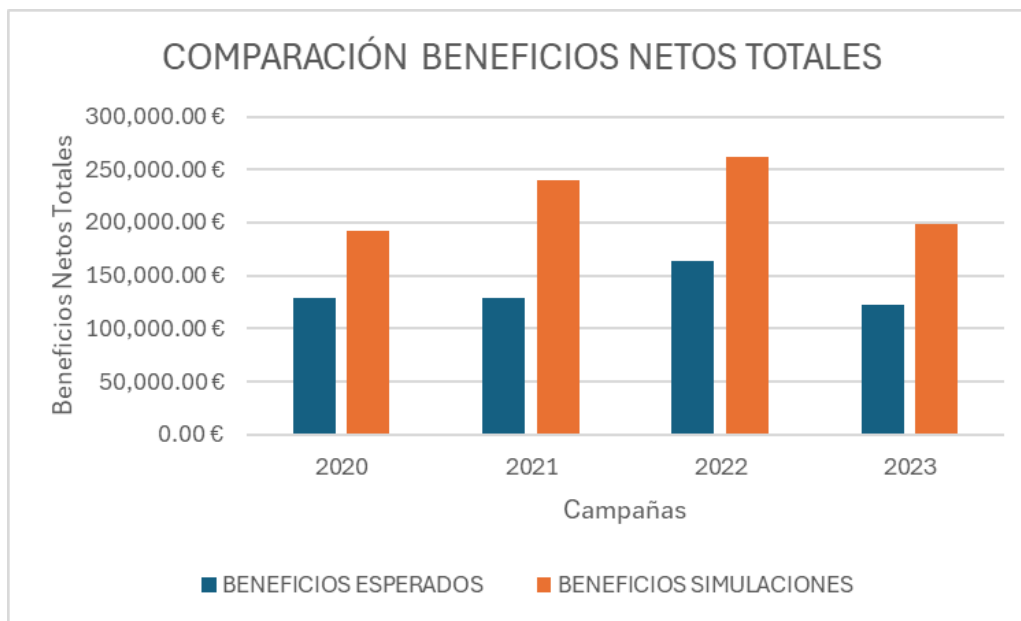


Figura 32: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Tras realizar esta verificación, hemos validado los resultados obtenidos al ejecutar el modelo y podemos seguir con nuestro análisis económico.

Estos resultados nos permiten extrapolar las siguientes conclusiones:

- Se verifica nuestra hipótesis de resultados esperados, al ser el cártamo el cultivo con la mayor rentabilidad económica cuando su riego se suministra a través de la energía renovable. Gracias al acuerdo contractual en el que se fija 800 €/ha en regadío y 200 €/ha en seco, además de repercutir el coste del riego al distribuidor, tenemos un cultivo con la mayor rentabilidad económica por hectárea en proporción con su consumo hídrico en metros cúbicos de agua por hectárea. Esto resulta intuitivo puesto que no solo se está comercializando con el cultivo de cártamo, sino que se genera cierto valor añadido al vender al distribuidor energía eléctrica, creada mediante generación solar a un coste menor que el precio del mercado eléctrico. De cara a nuestro plan de cultivos es conveniente potenciarlo para futuras campañas.
- En lo que respecta a los cultivos de regadío cuyo suministro energético proviene de la red eléctrica, observamos como el cártamo nos ofrece una mayor rentabilidad económica rondando un beneficio neto aproximado de 80,000 € por campaña. Esto vuelve a reafirmar las buenas condiciones contractuales pactadas y el buen ratio que tiene el cultivo de beneficio por hectárea frente a la cantidad de metros cúbicos de agua demandada.
- Por último, en lo que respecta a los cultivos de seco, no obtuvimos una tendencia que muestre un único cultivo que maximice el beneficio neto de la explotación. Podemos observar como en las campañas de 2021 y 2022, fue el cultivo de girasol el más rentable. Sin embargo, cuando analizamos detenidamente su balance, vemos como en 2021 el precio del girasol sufrió una extraordinaria subida hasta los 515 €/tn fruto de las tensiones geopolíticas entre Rusia y Ucrania. Cabe destacar como en 2007 Rusia producía el 45% de la producción mundial de girasol y Ucrania producía el 3,41%³¹. Además, las políticas económicas de la Unión Europea buscaron sancionar a Rusia dejando de importar las producciones agrícolas rusas, lo que generó escasez

³¹ Ortiz Mejiaz. (2010).

en el mercado. Un año después, en 2022 se despejó cualquier duda al iniciarse el conflicto bélico, generando aún más escasez de ciertos cultivos como el girasol en el mercado mundial puesto que ambos países tuvieron que adoptar economías de guerra.³² Es por ello por lo que, en 2022, podemos observar como el precio del girasol se incrementó hasta los 710 €/tn. En 2023, se trazaron nuevos acuerdos comerciales estabilizando los precios del girasol hasta los 285 €/tn. Por lo tanto, priorizaremos implementar el cultivo de trigo o cártamo al posicionarse en condiciones de mercado más estables.

Analizando ambos cultivos vemos dos alternativas, apostar por un cultivo como el trigo cuyo precio en 4 años se ha incrementado un 48.24% respecto 2020, puede llegar a proporcionar un beneficio neto de 45885 € y necesita una mayor inversión inicial al tener unos costes rondando los 45885.22€. O, por otro lado, optar por un cultivo como el cártamo que con unos rendimientos fijados por contrato que no dependen de la producción agrícola, pero sí del posible encarecimiento de los costes, con unos beneficios netos aproximados de 41600€ y una menor inversión inicial cercana a los 62400€.

Ahora pasamos a centrarnos en la elaboración de nuestro plan de cultivos de acuerdo con lo visto en el apartado de implementación de mejoras del Capítulo 3. Por el análisis previamente explicado hemos seleccionado el cártamo y el trigo como el par de cultivos con mayor rentabilidad para la superficie de secano, descartando el cultivo del girasol al considerar, un suceso excepcional, su inusual subida de precio en las campañas de 2021 y 2022.

En lo que respecta a la superficie de regadío suministrado por la red eléctrica y energía solar, como cultivo con mayor rentabilidad tendríamos el cultivo del cártamo. Para determinar el segundo cultivo más rentable volveremos a implementar nuestro modelo matemático pero esta vez excluyendo al cártamo. En el anexo 5 podemos encontrar el desarrollo completo seguido para obtener estos resultados:

³² Kushnirenko. (2023).

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	233.19	572171.88	491331.33	80840.55	1381806.99
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.81	139393.13	99815.17	39577.96	336637.31
2021	RED ELÉCTRICA	GIRASOL	114.71	165332.66	136619.61	28713.05	220292.53
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL	175.29	252647.21	188887.19	63760.02	336632.17
2022	RED ELÉCTRICA	GIRASOL	116.78	227495.57	185680.20	41815.37	226945.58
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL	173.22	337444.62	255536.80	81907.81	336628.82
2023	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	232.75	697737.65	628657.75	69079.90	1368530.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	57.25	171623.98	134749.76	36874.22	336620.27

Tabla 52: Resultados obtenidos para cada cultivo seleccionado tras optimizar, sin el cártamo, los beneficios de la explotación de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Comparamos sus beneficios netos totales por campaña con los beneficios históricos para comprobar la validez de nuestros resultados.

COMPARACIÓN BENEFICIOS NETOS TOTALES		
AÑO	BENEFICIOS REALES	BENEFICIOS MODELO
2020	65,831.36 €	120,418.52 €
2021	51,638.40 €	92,473.07 €
2022	74,991.84 €	123,723.18 €
2023	61,485.48 €	105,954.11 €

Tabla 53: Comparación de los beneficios netos totales reales y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Como podemos ver en la Tabla 20, en todas las campañas se vuelve a verificar la siguiente desigualdad:

Ec36. $(B_{T_modelo} > B_{T_real})$

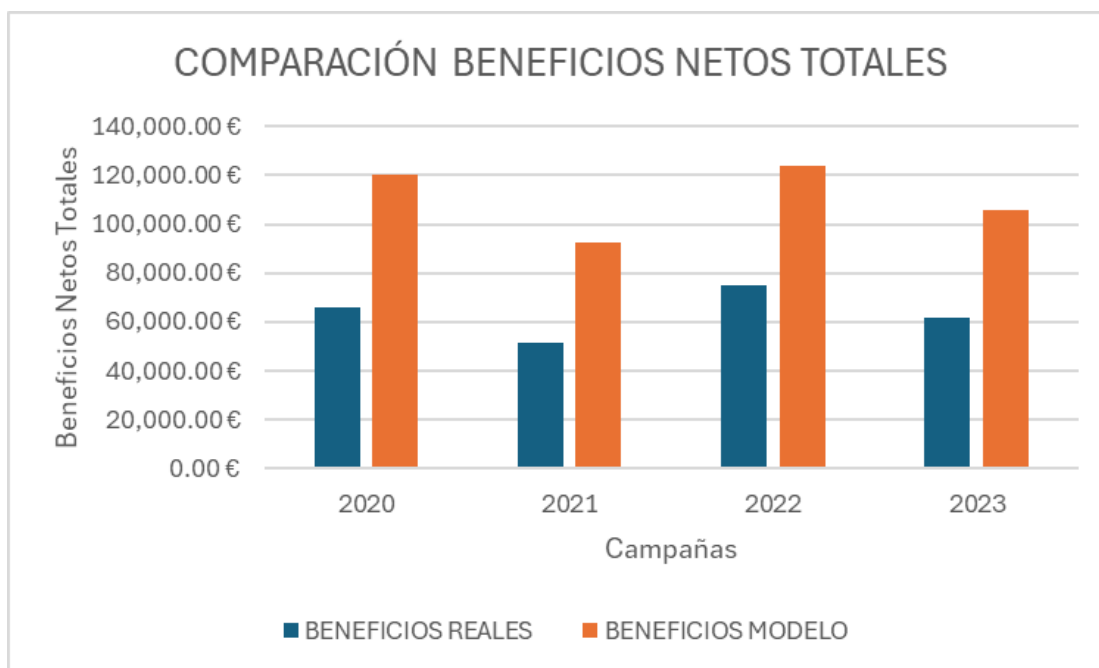


Figura 33: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales reales y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Adicionalmente, para verificar la efectividad de los resultados del modelo en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023, los hemos comparado también con el promedio de todos los cultivos calculado agrupándolos por cada tipología de superficie. Obsérvese como, a diferencia del caso anterior, en los beneficios netos esperados no contamos los beneficios netos totales de los cultivos de secano por campaña, siendo:

Ec37.

$$(B_{T_promedio} = B_{red} + B_{solar})$$

COMPARACIÓN BENEFICIOS NETOS TOTALES		
AÑO	BENEFICIOS ESPERADOS	BENEFICIOS SIMULACIONES
2020	97,827.86 €	120,418.52 €
2021	83,127.80 €	92,473.07 €
2022	104,440.56 €	123,723.18 €
2023	89,947.18 €	105,954.11 €

Tabla 54: Comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

Como podemos ver en la Tabla 20, en todas las campañas se vuelve a verificar la siguiente desigualdad:

Ec38.

$$(B_{T_modelo} > B_{T_promedio})$$

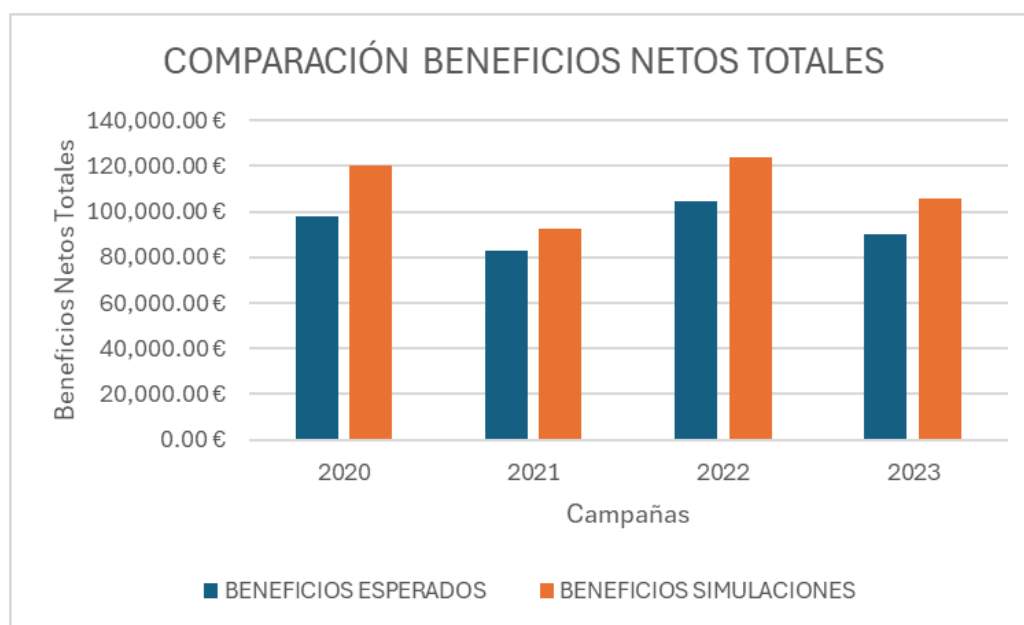


Figura 34: Gráfico con la comparación de los beneficios netos totales esperados y experimentales, sin los cultivos de secano y el cártamo, de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Tras realizar esta verificación, validamos los resultados de las ejecuciones y podemos seguir con nuestro análisis económico.

Al igual que en la superficie de secano, descartaremos al cultivo del girasol por sus excepcionales subidas de precio en 2021 y 2022, y seleccionamos a la remolacha como cultivo con la segunda mayor rentabilidad para los recintos de regadío. Por consiguiente, estos serían los cultivos seleccionados para cada tipología de superficie:

SUMINISTRO	CULTIVO CON LA MAYOR RENTABILIDAD	CULTIVO CON LA SEGUNDA MAYOR RENTABILIDAD
SECANO	TRIGO	CÁRTAMO
RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	REMOLACHA
ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	REMOLACHA

Tabla 55: Cultivos seleccionados para nuestro plan de cultivos optimizado. Elaboración propia. (2024).

Una vez seleccionados los pares de cultivos con una rentabilidad óptima para cada variedad de superficie, procedemos a ajustar nuestro plan de cultivos de acuerdo con el apéndice de “Escenario de proyección a futuro” del Capítulo 3. En el Anexo 6, explico el desarrollo matemático seguido para elaborar este plan. Aunque se repetirá cíclicamente siguiendo el mismo patrón, lo implementaremos como ejemplo en las campañas de 2024 a 2033.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2025	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2027	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2030	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2032	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Tabla 56: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).

Con los beneficios promedio de cada cultivo de las campañas de 2020 a 2023 podríamos estimar la rentabilidad que obtendríamos en la campaña de 2024. Esta previsión nos permite orientar nuestra inversión y administrar nuestra liquidez en el corto plazo.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)	Beneficio (€/Ha)	Beneficio (€)
2024	SECANO	TRIGO	520	82.3101375	42801.27
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51	450	105079.50
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49	634.2882207	35830.94

Tabla 57: Estimación de la rentabilidad obtenida en la campaña de 2024 siguiendo el plan de cultivo propuesto. Elaboración propia. (2024).

Finalmente, en continuación al escenario de proyección a futuro definimos el plan de mejora transitorio que vamos a establecer cada 20 años para realizar un muestreo actualizado de sus producciones y necesidades hídricas de cada cultivo.

AÑO	TIPOLOGÍA	CULTIVO	Ha
2044-2047	SECANO	CEBADA	127.5
		TRIGO	127.5
		CÁRTAMO	127.5
		GIRASOL	127.5
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	45.6
		TRIGO	45.6
		CÁRTAMO	45.6
		GIRASOL	45.6
		REMOLACHA	45.6
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	21.5
		TRIGO	21.5
		CÁRTAMO	21.5
		GIRASOL	21.5
REMOLACHA		21.5	

Tabla 58: Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).

Conclusión del análisis económico

El análisis económico realizado en este sexto capítulo ha sido crucial para identificar las estrategias más rentables y ajustar nuestro modelo según las necesidades de nuestra explotación. Hemos contrastado como nuestro modelo matemático propone una combinación de cultivos que hubieran superado la rentabilidad registrada de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2022, cumpliendo así con uno de los objetivos fundamentales de este trabajo. Tenemos un modelo matemático que mejora los rendimientos económicos de la explotación, pudiendo tener un impacto real en la explotación.

Con los resultados obtenidos en este capítulo, hemos podido validar como el cártamo es el cultivo más rentable en terrenos de regadío, especialmente cuando se utiliza energía renovable para su riego. Este cultivo no solo se beneficia de tener un precio fijo establecido contractualmente, sino que también se ve favorecido por la venta de energía solar a su distribuidor final, lo que permite generar un beneficio neto significativo que supera el promedio de otros cultivos. Las ejecuciones realizadas para las campañas de 2020 a 2023 corroboran la robustez del modelo, mostrando beneficios netos consistentes y superiores a los promedios esperados, lo que valida la efectividad de las estrategias implementadas.

En el caso de los cultivos de secano, no encontramos un cultivo determinado con una tendencia clara a tener la mayor rentabilidad; sin embargo, este apartado muestra como el girasol fue excepcionalmente rentable en 2021 y 2022 debido a tensiones geopolíticas que afectaron a su precio. Ante la inestabilidad del precio del girasol, priorizamos el trigo o el cártamo para las futuras campañas, siendo el trigo una opción más estable, aunque con mayores costos iniciales, y el cártamo una alternativa con rendimientos prefijados y menor inversión inicial.

Finalmente, la selección detallada de estos cultivos nos permitió implementar un plan de cultivos para las campañas de 2024 en adelante, con capacidad para integrar nuestro modelo matemático y con una minuciosa etapa transitoria que restablece nuestro modelo con parámetros agrícolas más recientes. Además, nos ha permitido maximizar la rentabilidad de la explotación agrícola, compatibilizándolo con ciertas exigencias agronómicas como la rotación de los cultivos o el barbecho. Hemos estimado los rendimientos aproximados de la campaña de 2023, para tener una referencia para ajustar nuestra inversión y liquidez de cara a la próxima campaña. Este apartado es crucial para el conjunto del TFG porque proporciona una base económica sólida que justifica las decisiones de gestión agrícola propuestas. En los siguientes capítulos, se presentará una evaluación de riesgo y retorno complementaria, comprobando si nuestra toma de decisiones fue acertada, y se realizarán las conclusiones de este proyecto.

7. Evaluación de riesgo y retorno:

Este apartado evalúa el retorno esperado bajo diferentes escenarios de riesgo, proporcionando una visión completa de la estabilidad del modelo. Se implementan herramientas de evaluación de riesgos y retornos, como el Modelo de Markowitz y el indicador VaR. Estas herramientas permiten evaluar los riesgos asociados a las decisiones de cultivo y riego, optimizando la rentabilidad de la explotación agrícola mientras se minimizan los riesgos.

El principal objetivo de esta sección es asimilar la actividad agropecuaria con la administración de portafolios. De la misma manera que un inversor bursátil en el mercado de valores decide entre varios activos con diferentes utilidades y riesgos para formar una cartera que maximice su retorno para un nivel específico de riesgo, el agricultor realiza un proceso similar al elaborar su plan de cultivos para la siguiente campaña.

Una vez elaborado el plan de cultivos que maximiza la rentabilidad económica, ahora me centraré en analizar el riesgo implícito en nuestras decisiones. Para ello empezaremos efectuando algunas observaciones sobre los resultados de producción y precio de cada campaña agrícola.

Precio (€/Tn)				
AÑO	CEBADA	TRIGO	GIRASOL	REMOLACHA
2020	145.00	170.00	345.00	25.29
2021	193.00	207.00	515.00	29.08
2022	318.00	334.00	710.00	32.97
2023	230.00	252.00	385.00	29.29

Tabla 59: Datos históricos de los precios por tonelada de los cultivos de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Los precios expuestos para la cebada, el trigo y el girasol fueron tomados del promedio anual de las cotizaciones de “La Lonja de León”, institución de referencia en el sector agrícola al comercializar las producciones recolectadas. Por otro lado, en el caso de la remolacha se tomaron los precios contractuales negociados anualmente con el único distribuidor de este cultivo, la cooperativa Acor.

Producción (Tn/ha)							
AÑO	REGADÍO				SECANO		
	CEBADA	TRIGO	GIRASOL	REMOLACHA	CEBADA	TRIGO	GIRASOL
2020	3771.34	4223.50	2800.49	97021.45	1785.76	1967.87	987.44
2021	3398.77	4088.77	2798.66	98788.98	1820.88	2099.89	1070.66
2022	3324.88	3821.89	2743.76	100000.00	1444.32	1881.93	1090.55
2023	3678.87	3679.04	2870.00	102348.88	1743.05	1945.40	1000.00

Tabla 60: Datos históricos de las producciones por hectárea de los cultivos de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Obsérvese como para este análisis no incluimos el cultivo del cártamo puesto que las condiciones contractuales fijadas con su distribuidor, Campos Amarillos Iberia sl, fijan unos beneficios anuales constantes en el tiempo e independientes de las producciones obtenidas.

Para entender si existe dependencia estadística entre ciertos cultivos en lo que respecta a su precio o producción, he realizado las siguientes matrices de correlación:

CORRELACIÓN DE PRECIOS (P)				
	CEBADA	TRIGO	GIRASOL	REMOLACHA
CEBADA	1			
TRIGO	0.99806876	1		
GIRASOL	0.85159899	0.8253316	1	
REMOLACHA	0.96925809	0.95275	0.89450033	1

Tabla 61: Matriz de correlaciones por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

En este caso observamos una fuerte correlación de precios, es por ello por lo que cada par de cultivos supone un riesgo similar. Por lo tanto, no sería ventajoso optar por la diversificación al establecer nuestro plan de cultivos. Gráfico la evolución de estos precios para mostrar visualmente esta correlación positiva.

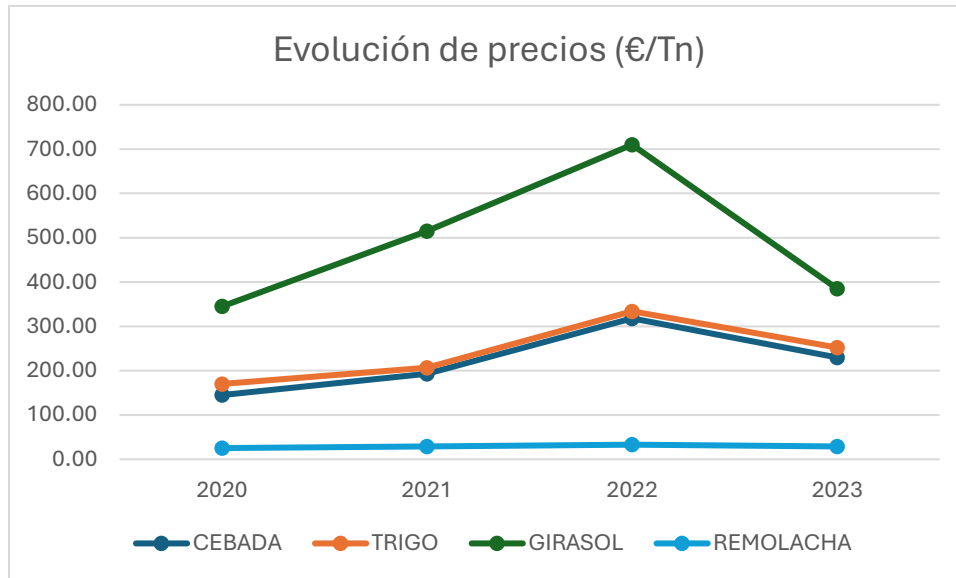


Figura 35: Evaluación de precios por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Esto se puede explicar porque todos los cultivos involucrados comparten gran parte de los factores que más afectan a sus precios. Entre otros factores podemos encontrar: las políticas comerciales, los conflictos geopolíticos, los insumos como agroquímicos y fertilizantes, los cambios demográficos, el coste del transporte, el precio del petróleo, la fluctuación del valor del euro y el crecimiento económico.

CORRELACIONES DE PRODUCCIÓN (Q)							
	CEBADA REGADÍO	TRIGO REGADÍO	GIRASOL REGADÍO	REMOLACHA REGADÍO	CEBADA SECANO	TRIGO SECANO	GIRASOL SECANO
CEBADA REGADÍO	1.00						
TRIGO REGADÍO	0.21	1.00					
GIRASOL REGADÍO	0.66	-0.31	1.00				
REMOLACHA REGADÍO	-0.13	-0.97	0.49	1.00			
CEBADA SECANO	0.57	0.48	0.65	-0.26	1.00		
TRIGO SECANO	-0.06	0.52	0.21	-0.33	0.78	1.00	
GIRASOL SECANO	-1.00	-0.15	-0.72	0.06	-0.59	0.05	1.00

Tabla 62: Matriz de correlaciones por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

En lo que respecta a la producción, encontramos un patrón distinto. Encontramos una fuerte correlación positiva entre: el girasol de regadío y la cebada de regadío, la cebada de regadío y la cebada de secano, el girasol de regadío y la cebada de secano, el trigo de secano y el de regadío, la cebada de secano y el trigo de secano. En nuestro plan de cultivos sería aconsejable evitar sembrar en la misma campaña estos pares de cultivos, para minimizar el riesgo de obtener bajas producciones en ambos casos.

Por otro lado, tenemos una fuerte correlación negativa entre la cebada de secano y el girasol de secano, girasol de secano y cebada de regadío, el trigo de regadío y la remolacha de regadío, el girasol de regadío y el de secano. Incluir estas combinaciones, especialmente entre los cultivos de regadío y de secano, puede resultar ventajoso puesto que las pérdidas en un cultivo pueden ser compensadas por las ganancias en el otro.

El resto de las correlaciones son cercanas a 0, actuando como variables independientes y sugiriendo la conveniencia de optar por la diversificación de cultivos, en lugar de campañas enteras con un único cultivo en toda la explotación.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2025	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2027	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2030	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2032	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Tabla 63: Plan de mejora original de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).

Si extrapolamos este análisis de riesgo al plan de cultivos sugerido por nuestro modelo económico para las campañas de 2024 a 2033, podríamos destacar ciertas combinaciones de cultivos acertadas a la hora de minimizar riesgo. Este es el caso de sembrar en la misma campaña trigo de secano y cártamo de regadío (correlación negativa de 0.33). Al incorporar en la gran mayoría de campañas el cultivo del cártamo, un cultivo con una rentabilidad fija pactada contractualmente, hemos propuesto un plan de cultivos que minimiza el riesgo a fluctuaciones en los precios y producciones de sus cultivos.

Sin embargo, si quisiéramos minimizar por completo el riesgo de nuestro modelo mientras mantenemos una cierta rotación de cultivos, podríamos sustituir el trigo de secano y la

remolacha de regadío, por el par de cultivos con mayor correlación negativa, el girasol de secano y la cebada de regadío. De tal forma, que pese a obtener potencialmente una menor rentabilidad máxima, asumamos el menor riesgo posible.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2025	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2027	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2030	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2032	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Tabla 64: Plan de mejora alternativo con mínimo riesgo de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).

Implementación del Modelo de Markowitz y del indicador VAR

Con el objetivo de cuantificar el riesgo asumido por el productor agropecuario, nos apoyaremos en el modelo de Markowitz que busca las combinaciones de activos con la mayor tasa de rendimientos para un nivel de riesgo determinado varianza o desvío estándar, y recurriremos al VAR (value at risk) que permite establecer la máxima pérdida posible dado un nivel de significancia p al asumir normalidad en los retornos en un horizonte de tiempo.

El modelo de Markowitz se basa en la combinación de diferentes cultivos para reducir el riesgo total de la campaña gracias a la no correlación perfecta entre los retornos de cada

cultivo, y en la optimización de la relación retorno-riesgo tras utilizar la varianza de los retornos como medida de riesgo. Matemáticamente, se busca minimizar la varianza de la cartera bajo la restricción de que la suma de los pesos de los activos sea igual a uno.

Para implementar este modelo hemos empleado la herramienta Python con los siguientes retornos por hectárea y por campaña (en €/ha) de cada uno de los siguientes cultivos.

RED ELÉCTRICA									
AÑO	CEBADA REGADIO	CEBADA SECANO	TRIGO REGADIO	TRIGO SECANO	GIRASOL REGADIO	GIRASOL SECANO	CÁRTAMO REGADIO	CÁRTAMO SECANO	REMOLACHA
2020	101	41	181	79	265	44	450	80	347
2021	80	34	126	66	250	171	450	80	184
2022	161	62	187	97	358	214	450	80	302
2023	150	44	107	88	204	33	450	80	297

Tabla 65: Datos históricos de los retornos por hectárea de los cultivos dependientes de fuentes fósiles de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

ENERGÍA SOLAR					
AÑO	CEBADA REGADIO	TRIGO REGADIO	GIRASOL REGADIO	CÁRTAMO REGADIO	REMOLACHA
2020	212	341	377	629	697
2021	194	291	364	633	537
2022	278	356	473	625	659
2023	257	266	314	645	644

Tabla 66: Datos históricos de los retornos por hectárea de los cultivos dependientes de energía solar de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

La matriz de covarianza muestra cómo los retornos de los cultivos se relacionan entre sí. Los valores positivos indican que los retornos de los cultivos tienden a moverse en la misma dirección, mientras que los valores negativos indican que tienden a moverse en direcciones opuestas. La diversificación se beneficia más de combinaciones de cultivos con covarianza negativa o cercana a 0.

	Cebada Regadio	Trigo Regadio	Girasol Regadio	Remolacha Regadio	Cebada Solar	Trigo Solar	Girasol Solar	Remolacha Solar	Cartamo Solar	Cebada Secano	Trigo Secano	Girasol Secano
Cebada Regadio	0.45	0.32	0.25	0.35	0.20	0.16	0.18	0.14	-0.01	0.40	0.23	-0.45
Trigo Regadio	0.32	0.24	0.20	0.23	0.14	0.12	0.14	0.09	-0.01	0.30	0.16	-0.11
Girasol Regadio	0.25	0.20	0.19	0.16	0.11	0.11	0.14	0.06	-0.01	0.25	0.13	0.17
Remolacha Regadio	0.35	0.23	0.16	0.31	0.15	0.11	0.11	0.13	-0.01	0.30	0.18	-0.67
Cebada Solar	0.20	0.14	0.11	0.15	0.09	0.07	0.08	0.06	-0.01	0.18	0.10	-0.15
Trigo Solar	0.16	0.12	0.11	0.11	0.07	0.06	0.08	0.04	-0.01	0.15	0.08	-0.01
Girasol Solar	0.18	0.14	0.14	0.11	0.08	0.08	0.10	0.04	-0.01	0.18	0.09	0.16
Remolacha Solar	0.14	0.09	0.06	0.13	0.06	0.04	0.04	0.05	0.00	0.12	0.07	-0.29
Cartamo Solar	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.02
Cebada Secano	0.40	0.30	0.25	0.30	0.18	0.15	0.18	0.12	-0.01	0.37	0.21	-0.17
Trigo Secano	0.23	0.16	0.13	0.18	0.10	0.08	0.09	0.07	-0.01	0.21	0.12	-0.22
Girasol Secano	-0.45	-0.11	0.17	-0.67	-0.15	-0.01	0.16	-0.29	-0.02	-0.17	-0.22	3.87

Tabla 67: Matriz de covarianza de los retornos históricos por hectárea de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

El portafolio óptimo, según la implementación del modelo de Markowitz en esta matriz de covarianza, asigna el 95.7% del peso al cultivo del cártamo con energía solar, el 3,5% al cultivo de la cebada regada con la red eléctrica, y el 0.8% al cultivo de girasol de secano. El resto de los cultivos no reciben ningún peso significativo.

Los pesos óptimos del portafolio para cada cultivo son:

- Cebada Regadío: 0.035
- Trigo Regadío: 0
- Girasol Regadío: 0
- Remolacha Regadío: 0
- Cebada Solar: 0
- Trigo Solar: 0
- Girasol Solar:0
- Remolacha Solar:0
- Cártamo Solar: 0.957
- Cebada Secano: 0

- Trigo Secano: 0
- Girasol Secano: 0.008

Estos resultados reafirman la validez del plan de mejora alternativo propuesto para las campañas de 2024 a 2033, al integrar el cultivo de cártamo y cebada en regadío, y girasol en seco.

Por otro lado, el VaR en una cartera de inversión define como la pérdida máxima esperable durante un horizonte temporal con un cierto nivel de confianza (en este caso establecimos un 95%). Éste asume que los retornos por hectárea de cada cultivo siguen una distribución normal. En este caso, el VaR al nivel de confianza del 95% es de -0.43967. Esto significa que, en el peor caso esperado, el plan de cultivos podría perder aproximadamente un 43.97% de su valor en un determinado horizonte temporal, con un 95% de confianza. Una cifra significativamente alta y que muestra un nivel de riesgo considerable. Esto puede deberse a la volatilidad de los rendimientos agrícolas que están influenciados por factores climáticos, plagas y fluctuaciones en los precios del mercado.

Tras conocer esta cifra, cabe aconsejar medidas adicionales para mitigar el riesgo, como el uso de los seguros agrícolas o contratos de futuro en la explotación agrícola. Además, resulta fundamental tenerla en cuenta a la hora de realizar ciertas inversiones de una campaña a otra y no caer en situaciones de endeudamiento por falta de liquidez.

En resumen, el análisis muestra que el "Cártamo Solar", la "Cebada Regadío" y el "Girasol Secano" son los cultivos más favorables según el modelo de Markowitz, maximizando el rendimiento de la explotación para un nivel dado de riesgo y reafirmando la utilidad del plan de cultivos seleccionado. La matriz de covarianza revela relaciones interesantes entre los cultivos, sugiriendo oportunidades para la diversificación del riesgo. El VaR proporciona una medida del riesgo de pérdida, que es significativamente alta.

Conclusión de la evaluación de riesgos y retorno.

La evaluación de riesgo y retorno de este capítulo se ha centrado en analizar la estabilidad del modelo agrícola propuesto bajo diferentes escenarios de riesgo. Éste revela como la planificación de cultivos puede asimilarse a la administración de portafolios financieros,

donde el agricultor selecciona un conjunto de cultivos para maximizar el retorno esperado para un nivel específico de riesgo. Utilizando herramientas como el Modelo de Markowitz y el indicador VaR (Value at Risk), se evaluó los riesgos asociados a las decisiones de cultivo y riego, optimizando la rentabilidad de la explotación agrícola mientras se minimizan los riesgos.

Las observaciones de los datos históricos de producción y precios para las campañas de 2020 a 2023, muestran una fuerte correlación entre los precios de los cultivos, indicando un nivel de riesgo similar entre ellos y sugiriendo que la diversificación en términos de precios no sería ventajosa. Por otro lado, en el análisis de la producción encontramos patrones distintos con correlaciones tanto positivas como negativas entre diferentes cultivos. La fuerte correlación positiva sugiere evitar sembrar ciertos pares de cultivos en la misma campaña para minimizar el riesgo de tener bajas producciones simultáneamente. En contraste, las correlaciones negativas entre algunos cultivos de regadío y secano pueden ser ventajosas, ya que las pérdidas en un cultivo pueden ser compensadas por las ganancias en el otro.

La implementación del Modelo de Markowitz demuestra que el "Cártamo Solar", la "Cebada Regadío" y el "Girasol Secano" son los cultivos más favorables, maximizando el rendimiento de la explotación para un nivel dado de riesgo. La matriz de covarianza entre los retornos históricos sugiere que la diversificación del riesgo se beneficia de combinaciones de cultivos con covarianza negativa o cercana a cero. En base a estos factores, hemos propuesto un plan de cultivos alternativo para las campañas de 2024 a 2033, con una rentabilidad potencial no tan elevada como el plan de cultivos previo, pero minimizando el riesgo asumido. Resultando conveniente para explotaciones con una liquidez reducida si pretendemos evitar situaciones de endeudamiento ante una mala campaña.

La importancia de este apartado radica en asegurar que el modelo agrícola propuesto puede manejar la incertidumbre y la variabilidad del sector. Este análisis es crucial para el conjunto del TFG, ya que garantiza que las estrategias propuestas no solo son rentables, sino también seguras y confiables a largo plazo. Este último capítulo cierra el proyecto proporcionando una comprensión integral de cómo mitigar riesgos y estableciendo una base sólida para la toma de decisiones futuras en la explotación agrícola. En el siguiente y último capítulo, se presentarán las conclusiones generales del proyecto.

8. Conclusiones y recomendaciones:

Logros del Trabajo

Este trabajo ha conseguido alcanzar varios logros significativos al elaborar un plan de mejora integral para la explotación multicultivo de Mayorga. En primer lugar, se ha logrado desarrollar y demostrar la eficacia de un modelo matemático que maximiza la rentabilidad económica y productividad de la explotación. Para ejecutar nuestro modelo matemático hemos implementado con éxito la programación lineal utilizando Matlab. Este modelo ha permitido identificar los cultivos más rentables en función de datos históricos de las campañas de 2020 a 2024, lo que ha resultado en una gestión más eficiente y rentable de los recursos disponibles, incluyendo el uso de energía solar para el riego.

Uno de los logros más destacados ha sido la realización de un riguroso contraste de hipótesis para verificar la consistencia y efectividad del modelo matemático. Utilizando pruebas estadísticas como el análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba T de Student, se confirmó que el modelo puede mejorar significativamente la rentabilidad al optimizar el uso de recursos hídricos y energéticos. Estos análisis validaron que la programación lineal puede tener un impacto consistente en la rentabilidad global sin variaciones bruscas en las condiciones climatológicas. Permitieron asegurar la precisión y robustez del modelo, demostrando su fiabilidad para generar planes de mejora óptimos.

Además, se ha conseguido llevar a cabo un análisis de sensibilidad detallado. Este análisis permitió identificar cómo las variaciones en las variables clave, como las necesidades hídricas y los precios de los cultivos, afectan la optimización de los cultivos más rentables. Los resultados mostraron que la rentabilidad de ciertos cultivos es altamente sensible a cambios en precios, costos y producción. Esto ha sido fundamental para ajustar nuestras estrategias de cultivo y maximizar la rentabilidad considerando las fluctuaciones del mercado.

Se realizó una comparación exitosa de los resultados del modelo con soluciones reales y promedios históricos para las campañas de 2020 a 2023, demostrando la capacidad del modelo para mejorar los rendimientos económicos por campaña, y confirmando la

efectividad del enfoque propuesto. Analizando exhaustivamente estos resultados se logró implementar un plan de cultivo óptimo para maximizar los rendimientos económicos potenciales por campaña.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2025	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2027	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2030	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	TRIGO	520
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.49
2032	SECANO	CÁRTAMO	520
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520
	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Tabla 68: Plan de mejora de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie.

Elaboración propia. (2024).

Con su respectiva etapa transitoria para que nos permita actualizar cada 20 años nuestro modelo matemático con un muestreo actualizado de sus producciones y necesidades hídricas de cada cultivo.

AÑO	TIPOLOGÍA	CULTIVO	Ha
2044-2047	SECANO	CEBADA	127.5
		TRIGO	127.5
		CÁRTAMO	127.5
		GIRASOL	127.5
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	45.6
		TRIGO	45.6
		CÁRTAMO	45.6
		GIRASOL	45.6
		REMOLACHA	45.6
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	21.5
		TRIGO	21.5
		CÁRTAMO	21.5
GIRASOL		21.5	
		REMOLACHA	21.5

Tabla 69: Plan de cultivos para la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).

Por último, se ha logrado diversificar los cultivos de manera que se mitigan los riesgos asociados a las fluctuaciones en los precios y la producción, asegurando una mayor estabilidad económica para la explotación. Con este proyecto se demostró que la planificación de cultivos puede asimilarse a la administración de portafolios financieros permitiendo optimizar la rentabilidad mientras se minimizan los riesgos y que se pueden implementar herramientas como el Modelo de Markowitz y el indicador VaR (Value at Risk). Las simulaciones realizadas con datos de las campañas de 2020 a 2023 han demostrado que el modelo no solo es robusto, sino también adaptable a diferentes condiciones climáticas y de mercado. Adicionalmente, se consiguió crear un plan de cultivos alternativo para las campañas de 2024 a 2033, priorizando la minimización del riesgo ante condiciones adversas.

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)
2024	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2025	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2026	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2027	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2028	SECANO	BARBECHO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2029	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2030	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62
2031	SECANO	GIRASOL	520.00
	RED ELÉCTRICA	BARBECHO	112.69
	ENERGÍA SOLAR	CEBADA	177.31
2032	SECANO	CÁRTAMO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CÁRTAMO	233.51
	ENERGÍA SOLAR	BARBECHO	56.49
2033	SECANO	BARBECHO	520.00
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	181.38
	ENERGÍA SOLAR	CÁRTAMO	108.62

Tabla 70: Plan de mejora alternativo con mínimo riesgo de las campañas 2024-2033 para cada categoría de superficie. Elaboración propia. (2024).

Estos han sido todos los logros alcanzados a lo largo de los siete capítulos que componen este trabajo titulado como “Plan de mejora de una explotación multicultivo en Mayorga”.

Objetivos Cumplidos

Este trabajo ha conseguido cumplir los objetivos clave que se habían fijado desde el inicio. En primer lugar, se ha maximizado la rentabilidad de la explotación agrícola mediante la optimización de los cultivos y el uso eficiente de los recursos disponibles. La implementación de un modelo matemático robusto ha proporcionado una herramienta efectiva para la toma de decisiones informadas sobre la gestión de cultivos, permitiendo ajustar las estrategias de cultivo según las variaciones del mercado y las características propias de la explotación.

Adicionalmente, otro objetivo cumplido ha sido la evaluación del impacto económico del uso de energía renovable para el riego de cultivos. El análisis económico detallado ha confirmado que el empleo de energía solar para el riego no solo es viable, sino también notablemente beneficioso económicamente.

Finalmente, se ha conseguido objetivo de implementar un análisis de riesgos que identificase y mitigase los riesgos asociados a la producción y precios de los cultivos, asegurando una mayor estabilidad y sostenibilidad a largo plazo para la explotación.

Aspectos No Logrados

A pesar de los logros alcanzados, hubo ciertos aspectos que no se pudieron llevar a cabo completamente. Uno de los principales desafíos fue probar en la propia explotación todas las mejoras propuestas debido a limitaciones de tiempo y recursos. Aunque el modelo matemático ha demostrado ser efectivo en las simulaciones, la implementación completa de las estrategias de diversificación de cultivos y optimización de recursos requerirá un seguimiento continuo para adaptarse a las condiciones cambiantes. Haber podido probar el plan de cultivo propuesto de 2024 a 2033 en la explotación agrícola, hubiera aportado un gran valor añadido a este trabajo.

Por otro lado, la variabilidad inherente del clima y las condiciones del mercado agrícola presenta desafíos que no se pueden prever completamente con el modelo actual, requiriendo de incluir análisis complejos sobre el cambio climático y estudios macroeconómicos del sector agrícola.

Conclusiones sobre la metodología.

Partiendo de un exhaustivo sondeo de las tecnologías, metodologías y modelos matemáticos existentes para optimizar los rendimientos económicos y eficiencia energética de una explotación agrícola, se optó por seguir con la metodología utilizada a lo largo de este trabajo.

El desarrollo de modelos matemáticos que implementan la programación lineal y el uso de herramientas de análisis de riesgos ha demostrado ser efectivo para optimizar la rentabilidad y sostenibilidad de la explotación agrícola en Mayorga de Campos. La teoría de portafolios

y la programación lineal han permitido crear un plan de cultivos que maximiza los beneficios económicos y otro alternativo que minimiza los riesgos.

Este enfoque planteado en este trabajo ha facilitado la identificación de los cultivos más rentables, y la distribución óptima de recursos, teniendo en cuenta variables clave como precios, producciones y costos. Además, la integración de técnicas avanzadas de simulación ha permitido validar y ajustar el modelo para reflejar cambios en las condiciones del entorno, asegurando así su consistencia y fiabilidad a largo plazo.

Finalmente, esta metodología no solo ha proporcionado un marco robusto para la toma de decisiones informadas, sino que también ha demostrado su flexibilidad y adaptabilidad, permitiendo su validez para seguir optimizando los resultados en futuras campañas agrícolas.

Conclusiones sobre el impacto de las mejoras.

Como pudimos ver en el Capítulo 6, en el apéndice de “Impacto en nuestra explotación”, las mejoras implementadas, incluyendo los planes de cultivo desarrollados para nuestra explotación, han mostrado un impacto positivo significativo en su rentabilidad.

El análisis de sensibilidad realizado y la evaluación económica detallada han confirmado la viabilidad de estas estrategias propuestas a largo plazo. Los resultados obtenidos tras ejecutar nuestro modelo en las campañas de 2020 a 2023 muestran unos beneficios netos superiores a los promedios esperados, destacando la rentabilidad del cártamo regado gracias a energía solar. Además, la diversificación en cultivos de regadío y secano ha permitido mitigar riesgos asociados a fluctuaciones en precios y producciones. Estos hallazgos han sido cruciales para ajustar las estrategias de cultivo para maximizar la rentabilidad y considerar las posibles fluctuaciones del mercado.

La implementación de estas mejoras ha demostrado ser una estrategia efectiva para incrementar la eficiencia y rentabilidad de la explotación, garantizando cumplir con los objetivos propuestos en este proyecto.

Recomendaciones para futuros estudios.

Teniendo en cuenta la poca investigación existente sobre la implementación de mejoras para la optimización de la rentabilidad económica de las explotaciones agrícolas, recomendaría apostar por modelos matemáticos con programación lineal que analicen otras facetas del sector agrícola fuera de la selección de cultivos, como podrían ser las dosis de abonado, la conveniencia de la siembra directa o la disyuntiva de la rentabilidad de subcontratar ciertas labores. La evaluación continua de riesgos y la implementación de estrategias de mitigación deben ser un componente clave de estos estudios futuros. En este trabajo se ha visto el potencial de un modelo con estas características y el amplio rango de áreas en la que se podría implementar.

Podría ser interesante realizar estudios adicionales para seguir actualizando y optimizando este modelo matemático, considerando cambios en las condiciones climáticas, nuevas inversiones y tecnologías disponibles. Además, se sugiere combinar este modelo con otras herramientas ya existentes, como podrían ser modelos de regresión lineal, nuevas fuentes de energía renovable y técnicas avanzadas de agricultura de precisión para seguir mejorando la eficiencia de la explotación.

9. Bibliografía:

Bibliografía

5 Ciruela-Lorenzo, A. M.-A.-O.-M.-A. (2020). Digitalization of agri-cooperatives in the smart agriculture context. proposal of a digital diagnosis tool. . *Artículo de investigación, Universidad de Málaga, Málaga.* .

Alejos Lop, D. (2016). Proyecto de eficiencia energética y energías renovables de la cooperativa agrícola Ntra Sra de los Pueyos. *UPC, Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona.*

Álvarez, L. B. (2014). *Estrategias de diversificación para un fideicomiso agropecuario.* Córdoba: Trabajo de fin de máster.

Ascencios Templo, D. R. (2021). *Eficiencia hídrica, energética y emisiones CO2 utilizando sistemas de riego presurizado en las áreas verdes de la UNALM.* Lima : Tesis para el grado de doctoris philosophiae en recursos hídricos.

Barboza-Navarro, D. S.-T.-M. (2021). Optimización económica para el cultivo de papa, zanahoria y cebolla en Cartago, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(4), 38-49.

Campaña. (2011). *Modelo matemático de programación lineal para optimizar la selección de fertilizantes a través de la disminución de costos en el cultivo de papa.* Ecuador: TFG, Universidad Escuela Politécnica Nacional,.

Cedar Lake Ventures, I. (2023). *Weather Spark.* Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/34822/Clima-promedio-en-Mayorga-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Temperature>

CEDEX, (. d. (2017). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural.*

Cid García, N. M. (2012). *Planificación de la producción agrícola y manejo eficiente del agua en un sistema de irrigación.* México: Maestría tesis, Universidad Autónoma de Nuevo León,.

Ciruela-Lorenzo, A. M.-A.-O.-M.-A. (2020). Digitalization of agri-cooperatives in the smart agriculture context. proposal of a digital diagnosis tool. *Artículo de investigación, Universidad de Málaga, Málaga.* .

- de Castro, I. G. (2023). *Modelización del resultado de producción de explotaciones sojeras chaqueñas*. Buenos Aires: XIX Simposio Regional de Investigación Contable.
- Fernández-Quintanilla, C. (2002). *Agricultura de precisión*. Madrid: CSIC - Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA).
- Gálvez, G. S. (2010). Modelación de cultivos agrícolas. *Artículo de investigación, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Cuba*.
- González Sánchez, A. (2007). *Uso de la Minería de Datos para la Elaboración de un Modelo de Predicción para la Optimización de la Producción Agrícola en Distritos de Riego-Edición Única*. México: Tesis doctoral, Instituto tecnológico y de estudios superiores de monterrey.
- González, J. F. (2002). Selección de portfolios de rotaciones culturales económicamente óptimos para la precordillera andina de la VIII Región. *Agricultura Técnica*, 62(4), 583-595.
- Hernando, F. M. (2016). La modernización de la explotación agraria en Castilla y León: empresarios agrarios y propietarios agrícolas. *In Paisaje, cultura territorial y vivencia de la geografía: Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil (pp. 629-652)*. Instituto Interuniversitario de Geografía.
- INE. (2017). "Nacimientos ocurridos en España. Primer semestre año 2017. Datos provisionales".
- Kushnirenko, Y. (2023). Análisis del sector agrícola de Ucrania. Consecuencias de la invasión rusa. El caso de NIBULON.
- Lamo de Espinosa y Michels de Champourcin, J. (2008). La agricultura española en perspectiva. *Artículo de investigación, UPM, Madrid*. .
- MAPAMA, (. d. (2017). *LA DISTRIBUCIÓN AGROALIMENTARIA Y TRANSFORMACIONES*.
- Ministeria de Agricultura, P. y. (2024). *Renta Agraria 2023*.
- Monja & Sedan. (2016). *Aplicación de la programación lineal en la planeación y programación de la producción de azúcar, para mejorar la productividad de la empresa agroindustrial Pomalca SAA*. Perú: Tesis doctoral, Universidad Señor de Sipan-Pimentel.

- Morrás Lorenzo, A. (2018). Exploración de oportunidades de emprendimiento a partir del sector agrícola en España aprovechando las mejoras tecnológicas. *Trabajo de fin de Máster , ICAI, Madrid.*
- Mosquera. (2011). *Diseño de un modelo de Planificación de cultivos para mejorar el desempeño de pequeñas y medianos productores de papa.* Colombia: Trabajo de fin de grado, Universidad de la Sabana.
- NASA, N. A. (2023). *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2.*
- Ortega-Gaucin, D. M. (2009). *Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego.* Montecillo, México: Libro, Terra Latinoamericana, 27(3), 219-226.
- Ortiz Mejiaz, L. F. (2010). Cultivo de Girasol (*Helianthus annuus L.*).
- Palacios, E., & García, A. E. (1986). *Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego.* Chapingo, México: Texcoco: Colegio de Postgraduados, Centro de Hidrociencias.
- Palacios-Vélez, E. y. (1989). *Introducción a la teoría de la opración de distritos y sistemas de riego.* Montecillo, México: Colegio de Posgraduados, Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Yong. (2018). Optimized nitrogen application methods to improve nitrogen use efficiency and nodule nitrogen fixation in a maize-soybean relay intercropping system. *Journal of Integrative Agriculture,*, págs. 17(3): 664-676.

10. Apéndices:

En los siguientes anexos podemos encontrar el desarrollo detallado de los cálculos realizados para la obtención de los resultados mostrados en este proyecto.

Cabe puntualizar cual será la nomenclatura empleada en nuestro modelo de programación lineal para los siguientes apartados:

$S_1 =$ superficie en hectáreas de cebada, regadio de red eléctrica

$S_2 =$ superficie en hectáreas de cebada, secano

$S_3 =$ superficie en hectáreas de trigo, regadio de red eléctrica

$S_4 =$ superficie en hectáreas de trigo, secano

$S_5 =$ superficie en hectáreas de girasol, regadio de red eléctrica

$S_6 =$ superficie en hectáreas de girasol, secano

$S_7 =$ superficie en hectáreas de cártamo, regadio de red eléctrica

$S_8 =$ superficie en hectáreas de cártamo, secano

$S_9 =$ superficie en hectáreas de remolacha, regadio de red eléctrica

$S_{10} =$ superficie en hectáreas de cebada, regadio de energía solar

$S_{11} =$ superficie en hectáreas de trigo, regadio de energía solar

$S_{12} =$ superficie en hectáreas de girasol, regadio de energía solar

$S_{13} =$ superficie en hectáreas de cártamo, regadio de energía solar

$S_{14} =$ superficie en hectáreas de remolacha, regadio de energía solar

N = Beneficio neto obtenido en hectáreas.

Anexo 1

Este es el modelo matemático empleado para crear periódicamente el plan de cultivos de las etapas transitorias.

Variables:

N_1 = Necesidades hídricas del cultivo 1 (m^3/ha)

N_2 = Necesidades hídricas del cultivo 2 (m^3/ha)

N_3 = Necesidades hídricas del cultivo 3 (m^3/ha)

N_4 = Necesidades hídricas del cultivo 4 (m^3/ha)

N_5 = Necesidades hídricas del cultivo 5 (m^3/ha)

Sistema de ecuaciones:

Asumimos inicialmente que todas las superficies son iguales:

$$Ec39. \quad (S_{10} = S_{11} = S_{12} = S_{13} = S_{14} = S)$$

La restricción hídrica se convierte en:

$$Ec40. \quad (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) * S \leq \textit{Agua Disponible}$$

Despejamos S:

$$Ec41. \quad (S \leq \frac{\textit{Agua Disponible}}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5})$$

Por lo tanto, se pueden sembrar aproximadamente S hectáreas de cada cultivo para cumplir con la restricción hídrica.

Esta sería su implementación para el caso particular del plan de cultivos para las campañas de 2044 a 2047. Para su resolución se empleó Matlab y nos basamos en las necesidades hídricas promedio de las campañas de 2020 a 2024.

Datos Específicos:

$$N_1 = 1898.4625 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ (Cebada)}$$

$$N_2 = 2763.245 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ (Trigo)}$$

$$N_3 = 3099.2475 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ (Cártamo)}$$

$$N_4 = 1904.355 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ (Girasol)}$$

$$N_5 = 5959.1 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ (Remolacha)}$$

$$\text{Agua Total Disponible: } 336625.14 \text{ m}^3$$

Cálculo:

$$Ec42. \quad (S \leq \frac{336625.14}{1898.4625 + 2763.245 + 3099.2475 + 1904.355 + 5959.1336625.1})$$

$$S = 21.54 \text{ hectáreas para cada cultivo}$$

Plan de cultivos:

La distribución aproximada es de 21.5 hectáreas para cada uno de los cinco cultivos regados a través de energía solar, asegurando que se utiliza el agua disponible de manera equitativa. Puesto que tenemos 290 hectáreas en total, nos quedarían 182.5 hectáreas para los otros 5 cultivos regado a través de la red eléctrica. Este sería el plan de cultivos correspondiente:

AÑO	TIPOLOGÍA	CULTIVO	Ha
2044-2047	SECANO	CEBADA	127.5
		TRIGO	127.5
		CÁRTAMO	127.5
		GIRASOL	127.5
	RED ELÉCTRICA	CEBADA	45.6
		TRIGO	45.6
		CÁRTAMO	45.6
		GIRASOL	45.6
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	45.6
		CEBADA	21.5
		TRIGO	21.5
		CÁRTAMO	21.5
		GIRASOL	21.5
		REMOLACHA	21.5

Tabla 71: Plan de cultivos de la etapa transitoria de 2044 a 2047. Elaboración propia. (2024).

Anexo 2

Así se ejecutó nuestro modelo matemático a través de la de la programación lineal en Matlab en las campañas de 2021, 2022 y 2023.

Campaña 2021:

- Función objetivo:

$$Ec43. \quad (N = 79.96 * S_1 + 34.43 * S_2 + 126.37 * S_3 + 65.67 * S_4 + 250.31 * S_5 + 171.39 * S_6 + 450 * S_7 + 80 * S_8 + 183.78 * S_9 + 194.11 * S_{10} + 290.93 * S_{11} + 363.74 * S_{12} + 633.30 * S_{13} + 537.41 * S_{14})$$

- Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec44. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec45. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec46. \quad (1932.59 * S_{10} + 2785.93 * S_{11} + 1920.43 * S_{12} + 3103.44 * S_{13} + 5987.01 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Campaña 2022:

- Función objetivo:

$$Ec47. \quad (N = 161.31 * S_1 + 62.29 * S_2 + 186.51 * S_3 + 96.56 * S_4 + 358.07 * S_5 + 214.29 * S_6 + 450 * S_7 + 80 * S_8 + 302 * S_9 + 277.72 * S_{10} + 355.96 * S_{11} + 472.85 * S_{12} + 625.36 * S_{13} + 658.98 * S_{14})$$

- Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec48. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec49. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec50. \quad (1970.77 * S_{10} + 2868.98 * S_{11} + 1943.36 * S_{12} + 2968.93 * S_{13} + 6043.89 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Campaña 2023:

- **Función objetivo:**

$$Ec51. \quad (N = 150.14 * S_1 + 43.90 * S_2 + 107.12 * S_3 + 88.24 * S_4 + 203.95 * S_5 + 33 * S_6 + 450 * S_7 + 80 * S_8 + 296.8 * S_9 + 256.74 * S_{10} + 265.96 * S_{11} + 313.51 * S_{12} + 644.66 * S_{13} + 644.09 * S_{14})$$

- **Restricciones:**

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec52. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec53. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec54. \quad (1804.86 * S_{10} + 2689.28 * S_{11} + 1854.85 * S_{12} + 3295.74 * S_{13} + 5879.83 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Anexo 3

Análisis de sensibilidad

Como punto de partida tenemos los datos históricos registrados en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Obsérvese como para el cultivo del cártamo las columnas de kg por ha y precio por tonelada, se encuentran en blanco. Esto se debe a la naturaleza del contrato de arrendamiento con la empresa Campos Amarillos, independientemente de la producción de cártamo obtenida nos abonan una cantidad de 800 € por hectárea en regadío y 200 € por hectárea en secano. Además, cabe puntualizar que el cultivo de la remolacha solo puede darse en recintos de regadío en un clima continental templado debido a sus intensas necesidades hídricas.

RED ELÉCTRICA						
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	446.00	100.84
	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	218.00	40.94
	TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	536.80	181.20
	TRIGO SECANO	1987.87	170.00	334.54	255.78	78.76
	GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	966.17	701.00	265.17
	GIRASOL SECANO	987.44	345.00	340.67	297.00	43.67
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
	REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2107.00	346.67
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	576.00	79.96
	CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	317.00	34.43
	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	846.38	720.00	126.38
	TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	369.00	65.68
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1191.00	250.31
	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	380.00	171.39
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
	REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2689.00	183.78
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	896.00	161.31
	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	397.00	62.29
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1276.51	1090.00	186.51
	TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	532.00	96.56
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1590.00	358.07
	GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	560.00	214.29
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
	REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2995.00	302.00
2023	CEBADA REGADIO	3678.87	230.00	846.14	696.00	150.14
	CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	357.00	43.90
	TRIGO REGADIO	3679.04	252.00	927.12	820.00	107.12
	TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	402.00	88.24
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	901.00	203.95
	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	352.00	33.00
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
	REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2701.00	296.80

Tabla 72: Datos históricos de las producciones, costes y beneficios por cultivo regados a través de la red eléctrica de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

ENERGÍA SOLAR											
AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	212.22	2021	CEBADA REGADIO	194.11	2022	CEBADA REGADIO	277.72	2023	CEBADA REGADIO	256.74
	TRIGO REGADIO	341.19		TRIGO REGADIO	290.93		TRIGO REGADIO	355.97		TRIGO REGADIO	265.96
	GIRASOL REGADIO	377.32		GIRASOL REGADIO	363.74		GIRASOL REGADIO	472.85		GIRASOL REGADIO	313.51
	CÁRTAMO REGADIO	628.90		CÁRTAMO REGADIO	633.30		CÁRTAMO REGADIO	625.36		CÁRTAMO REGADIO	644.66
	REMOLACHA	696.67		REMOLACHA	537.41		REMOLACHA	658.98		REMOLACHA	644.09

Tabla 73: Datos históricos de los beneficios por cultivo regados a través de energía solar de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Caso Base: Necesidades hídricas por cultivo.				
AÑO	CULTIVO	DOSIS (m3/ha)	€/m3	COSTE RIEGO (€/ha)
2020	CEBADA REGADIO	1885.63	0.059	111.37
	TRIGO REGADIO	2708.79	0.059	159.99
	GIRASOL REGADIO	1898.78	0.059	112.15
	CÁRTAMO REGADIO	3028.88	0.059	178.90
	REMOLACHA	5925.67	0.059	350.00
2021	CEBADA REGADIO	1932.59	0.059	114.15
	TRIGO REGADIO	2785.93	0.059	164.55
	GIRASOL REGADIO	1920.43	0.059	113.43
	CÁRTAMO REGADIO	3103.44	0.059	183.30
	REMOLACHA	5987.01	0.059	353.62
2022	CEBADA REGADIO	1970.77	0.059	116.40
	TRIGO REGADIO	2868.98	0.059	169.46
	GIRASOL REGADIO	1943.36	0.059	114.78
	CÁRTAMO REGADIO	2968.93	0.059	175.36
	REMOLACHA	6043.89	0.059	356.98
2023	CEBADA REGADIO	1804.86	0.059	106.60
	TRIGO REGADIO	2689.28	0.059	158.84
	GIRASOL REGADIO	1854.85	0.059	109.56
	CÁRTAMO REGADIO	3295.74	0.059	194.66
	REMOLACHA	5879.83	0.059	347.29

Tabla 74: Necesidades hídricas anuales registradas en m3/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Ahora incorporamos los siguientes escenarios a nuestro modelo de regresión lineal:

- Precios de los cultivos:
 - Escenario optimista: Aumento del 10 % en los precios.

Precios de los cultivos										
Escenario optimista: Aumento del 10 % en los precios.										
RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR			
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	159.50	601.53	448.00	155.53	2020	CEBADA REGADIO	270.87	
	CEBADA SECANO	1785.78	159.50	284.83	218.00	66.83		TRIGO REGADIO	348.99	
	TRIGO REGADIO	4223.50	187.00	789.79	538.80	252.99		GIRASOL REGADIO	491.65	
	TRIGO SECANO	1987.87	187.00	367.99	255.78	112.21			CÁRTAMO REGADIO	178.90
	GIRASOL REGADIO	2800.49	379.50	1062.79	701.00	361.79		REMOLACHA	377.82	
	GIRASOL SECANO	987.44	379.50	374.73	297.00	77.73				
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	880.00	350.00	530.00				
	CÁRTAMO SECANO		0.00	220.00	120.00	100.00				
REMOLACHA	97021.45	27.82	2699.04	2107.00	592.04					
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	212.30	721.58	578.00	145.58	2021	CEBADA REGADIO	326.45	
	CEBADA SECANO	1820.88	212.30	386.57	317.00	69.57		TRIGO REGADIO	392.25	
	TRIGO REGADIO	4088.77	227.70	931.01	720.00	211.01		GIRASOL REGADIO	679.93	
	TRIGO SECANO	2099.89	227.70	478.14	389.00	109.14			CÁRTAMO REGADIO	183.30
	GIRASOL REGADIO	2798.68	588.50	1585.44	1191.00	394.44		REMOLACHA	385.61	
	GIRASOL SECANO	1070.66	588.50	606.53	380.00	226.53				
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	880.00	350.00	530.00				
	CÁRTAMO SECANO		0.00	220.00	120.00	100.00				
REMOLACHA	98788.98	31.99	3180.08	2899.00	471.08					
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	349.80	1163.04	896.00	267.04	2022	CEBADA REGADIO	468.20	
	CEBADA SECANO	1444.32	349.80	505.22	397.00	108.22		TRIGO REGADIO	538.88	
	TRIGO REGADIO	3821.89	387.40	1404.16	1090.00	314.16		GIRASOL REGADIO	895.78	
	TRIGO SECANO	1881.93	387.40	691.42	532.00	159.42			CÁRTAMO REGADIO	175.38
	GIRASOL REGADIO	2743.78	781.00	2142.88	1590.00	552.88		REMOLACHA	393.25	
	GIRASOL SECANO	1090.55	781.00	851.72	580.00	291.72				
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	880.00	350.00	530.00				
	CÁRTAMO SECANO		0.00	220.00	120.00	100.00				
REMOLACHA	100000.00	36.27	3626.70	2995.00	631.70					
2023	CEBADA REGADIO	3878.87	253.00	930.75	696.00	234.75	2023	CEBADA REGADIO	359.60	
	CEBADA SECANO	1743.05	253.00	440.99	357.00	83.99		TRIGO REGADIO	438.04	
	TRIGO REGADIO	3879.04	277.20	1019.83	820.00	199.83		GIRASOL REGADIO	533.08	
	TRIGO SECANO	1945.40	277.20	539.28	402.00	137.28			CÁRTAMO REGADIO	194.88
	GIRASOL REGADIO	2870.00	423.50	1215.45	901.00	314.45		REMOLACHA	379.51	
	GIRASOL SECANO	1000.00	423.50	423.50	352.00	71.50				
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	880.00	350.00	530.00				
	CÁRTAMO SECANO		0.00	220.00	120.00	100.00				
REMOLACHA	102348.88	32.22	3297.58	2701.00	596.58					

Tabla 75: Desglose económico del escenario optimista de un supuesto aumento del 10 % en los precios por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “Precios (€/Tn)” se ve multiplicada por 1.1 respecto al caso base. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenido en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$\begin{aligned}
 \text{Ec55.} \quad (N = & 155.53 * S_1 + 66.83 * S_2 + 252.99 * S_3 + 112.21 * S_4 + \\
 & 361.79 * S_5 + 77.73 * S_6 + 530 * S_7 + 100 * S_8 + 592.04 * S_9 + \\
 & 266.9 * S_{10} + 412.99 * S_{11} + 473.94 * S_{12} + 708.9 * S_{13} + \\
 & 942.04 * S_{14})
 \end{aligned}$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$\text{Ec56.} \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$\text{Ec57.} \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$\begin{aligned}
 \text{Ec58.} \quad (1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * S_{13} + \\
 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)
 \end{aligned}$$

- Escenario pesimista: Reducción del 10 % en los precios.

Precios de los cultivos									
Escenario pesimista: Reducción del 10 % en los precios.									
RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR		
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	130.50	492.16	446.00	46.16	2020	CEBADA REGADIO	157.53
	CEBADA SECANO	1785.76	130.50	233.04	218.00	15.04		TRIGO REGADIO	289.39
	TRIGO REGADIO	4223.50	153.00	646.20	536.80	109.40		GIRASOL REGADIO	280.70
	TRIGO SECANO	1967.87	153.00	301.08	255.78	45.30			CÁRTAMO REGADIO
	GIRASOL REGADIO	2800.49	310.50	869.55	701.00	168.55		REMOLACHA	451.31
	GIRASOL SECANO	967.44	310.50	306.80	297.00	9.80			
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	720.00	350.00	370.00			
	CÁRTAMO SECANO		0.00	180.00	120.00	60.00			
REMOLACHA	97021.45	22.76	2208.31	2107.00	101.31				
2021	CEBADA REGADIO	3396.77	173.70	590.37	576.00	14.37	2021	CEBADA REGADIO	128.51
	CEBADA SECANO	1820.88	173.70	316.29	317.00	-0.71		TRIGO REGADIO	206.29
	TRIGO REGADIO	4088.77	186.30	761.74	720.00	41.74		GIRASOL REGADIO	219.61
	TRIGO SECANO	2099.89	186.30	391.21	369.00	22.21			CÁRTAMO REGADIO
	GIRASOL REGADIO	2798.66	483.50	1297.18	1191.00	106.18		REMOLACHA	250.13
	GIRASOL SECANO	1070.68	483.50	496.25	380.00	116.25			
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	720.00	350.00	370.00			
	CÁRTAMO SECANO		0.00	180.00	120.00	60.00			
REMOLACHA	96766.98	26.17	2585.51	2689.00	-103.49				
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	286.20	951.58	896.00	55.58	2022	CEBADA REGADIO	171.98
	CEBADA SECANO	1444.32	286.20	413.36	397.00	16.36		TRIGO REGADIO	228.32
	TRIGO REGADIO	3821.89	300.60	1148.86	1090.00	58.86		GIRASOL REGADIO	278.05
	TRIGO SECANO	1881.93	300.60	565.71	532.00	33.71			CÁRTAMO REGADIO
	GIRASOL REGADIO	2743.78	639.00	1753.26	1590.00	163.26		REMOLACHA	329.28
	GIRASOL SECANO	1090.55	639.00	696.86	560.00	136.86			
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	720.00	350.00	370.00			
	CÁRTAMO SECANO		0.00	180.00	120.00	60.00			
REMOLACHA	100000.00	29.67	2967.30	2995.00	-27.70				
2023	CEBADA REGADIO	3678.87	207.00	761.53	696.00	65.53	2023	CEBADA REGADIO	172.13
	CEBADA SECANO	1743.05	207.00	360.81	357.00	3.81		TRIGO REGADIO	173.25
	TRIGO REGADIO	3679.04	226.80	834.41	820.00	14.41		GIRASOL REGADIO	203.01
	TRIGO SECANO	1945.40	226.80	441.22	402.00	39.22			CÁRTAMO REGADIO
	GIRASOL REGADIO	2870.00	346.50	994.46	901.00	93.46		REMOLACHA	344.31
	GIRASOL SECANO	1000.00	346.50	346.50	352.00	-5.50			
	CÁRTAMO REGADIO		0.00	720.00	350.00	370.00			
	CÁRTAMO SECANO		0.00	180.00	120.00	60.00			
REMOLACHA	102348.88	26.36	2696.02	2701.00	-2.98				

Tabla 76: Desglose económico del escenario pesimista de una supuesta reducción del 10 % en los precios por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “Precios (€/Tn)” se ve multiplicada por 0.9 respecto al caso base. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenido en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$Ec59. \quad (N = 46.16 * S_1 + 15.04 * S_2 + 109.40 * S_3 + 45.30 * S_4 + 168.55 * S_5 + 9.6 * S_6 + 370 * S_7 + 60 * S_8 + 101.31 * S_9 + 157.53 * S_{10} + 269.39 * S_{11} + 280.70 * S_{12} + 548.90 * S_{13} + 451.31 * S_{14})$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec60. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec61. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

$$Ec62. \quad (1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * S_{13} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)$$

- Producciones agrícolas
 - Escenario optimista: Aumento del 10 % en las producciones.

Producciones de los cultivos									
Escenario optimista: Aumento del 10 % en los producción.									
RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR		
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	4148.47	145.00	601.53	446.00	155.53	2020	CEBADA REGADIO	266.90
	CEBADA SECANO	1964.34	145.00	284.83	218.00	66.83		TRIGO REGADIO	412.99
	TRIGO REGADIO	4645.85	170.00	789.79	536.80	252.99		GIRASOL REGADIO	473.94
	TRIGO SECANO	2164.66	170.00	367.99	255.78	112.21		CÁRTAMO REGADIO	626.90
	GIRASOL REGADIO	3080.54	345.00	1062.79	701.00	361.79		REMOLACHA	942.04
	GIRASOL SECANO	1066.18	345.00	374.73	297.00	77.73			
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00			
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	106723.60	25.29	2699.04	2107.00	592.04				
2021	CEBADA REGADIO	3738.65	193.00	721.56	576.00	145.56	2021	CEBADA REGADIO	259.71
	CEBADA SECANO	2002.97	193.00	386.57	317.00	69.57		TRIGO REGADIO	375.56
	TRIGO REGADIO	4497.65	207.00	931.01	720.00	211.01		GIRASOL REGADIO	507.87
	TRIGO SECANO	2309.88	207.00	478.14	369.00	109.14		CÁRTAMO REGADIO	633.30
	GIRASOL REGADIO	3078.53	515.00	1585.44	1191.00	394.44		REMOLACHA	624.66
	GIRASOL SECANO	1177.73	515.00	606.53	380.00	226.53			
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00			
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	106667.66	29.08	3160.06	2669.00	471.06				
2022	CEBADA REGADIO	3657.37	318.00	1163.04	896.00	267.04	2022	CEBADA REGADIO	363.45
	CEBADA SECANO	1588.75	318.00	505.22	397.00	108.22		TRIGO REGADIO	463.62
	TRIGO REGADIO	4204.08	334.00	1404.16	1090.00	314.16		GIRASOL REGADIO	667.66
	TRIGO SECANO	2070.12	334.00	691.42	532.00	159.42		CÁRTAMO REGADIO	625.36
	GIRASOL REGADIO	3018.14	710.00	2142.88	1590.00	552.88		REMOLACHA	966.66
	GIRASOL SECANO	1199.61	710.00	851.72	560.00	291.72			
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00			
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	110000.00	32.97	3626.70	2995.00	631.70				
2023	CEBADA REGADIO	4046.76	230.00	930.75	696.00	234.75	2023	CEBADA REGADIO	341.36
	CEBADA SECANO	1917.36	230.00	440.99	357.00	83.99		TRIGO REGADIO	358.67
	TRIGO REGADIO	4046.94	252.00	1019.83	820.00	199.83		GIRASOL REGADIO	424.00
	TRIGO SECANO	2139.94	252.00	539.26	402.00	137.26		CÁRTAMO REGADIO	644.66
	GIRASOL REGADIO	3157.00	385.00	1215.45	901.00	314.45		REMOLACHA	943.67
	GIRASOL SECANO	1100.00	385.00	423.50	352.00	71.50			
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00			
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	112583.77	29.29	3297.58	2701.00	596.58				

Tabla 77: Desglose económico del escenario optimista de un supuesto aumento del 10 % en la producción por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “Producción (Kg/Ha)” se ve multiplicada por 1.1 respecto al caso base. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenido en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

Ec63. $(N = 155.53 * S_1 + 66.83 * S_2 + 252.99 * S_3 + 112.21 * S_4 + 361.79 * S_5 + 77.73 * S_6 + 450 * S_7 + 80 * S_8 + 592.04 * S_9 + 266.90 * S_{10} + 412.99 * S_{11} + 473.94 * S_{12} + 628.9 * S_{13} + 942.04 * S_{14})$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

Ec64. $(S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

Ec65. $(S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

Ec66. $(1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * S_{13} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)$

- Escenario pesimista: Reducción del 10 % en las producciones.

Producciones de los cultivos										
Escenario pesimista: Reducción del 10 % en la producción.										
RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR			
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	
2020	CEBADA REGADIO	3394.20	145.00	492.16	446.00	46.16	2020	CEBADA REGADIO	157.53	
	CEBADA SECANO	1607.18	145.00	233.04	218.00	15.04		TRIGO REGADIO	269.39	
	TRIGO REGADIO	3801.15	170.00	646.20	536.80	109.40		GIRASOL REGADIO	280.70	
	TRIGO SECANO	1771.08	170.00	301.08	255.78	45.30			CÁRTAMO REGADIO	628.90
	GIRASOL REGADIO	2520.44	345.00	869.55	701.00	168.55		CÁRTAMO SECANO	80.00	
	GIRASOL SECANO	888.70	345.00	306.80	297.00	9.80			REMOLACHA	451.31
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00				
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00				
REMOLACHA	87319.31	25.29	2208.31	2107.00	101.31					
2021	CEBADA REGADIO	3058.89	193.00	590.37	576.00	14.37	2021	CEBADA REGADIO	128.51	
	CEBADA SECANO	1638.79	193.00	316.29	317.00	-0.71		TRIGO REGADIO	206.29	
	TRIGO REGADIO	3879.89	207.00	781.74	720.00	61.74		GIRASOL REGADIO	219.61	
	TRIGO SECANO	1889.90	207.00	391.21	369.00	22.21			CÁRTAMO REGADIO	633.30
	GIRASOL REGADIO	2518.79	515.00	1297.18	1191.00	106.18		CÁRTAMO SECANO	80.00	
	GIRASOL SECANO	983.59	515.00	496.25	380.00	116.25			REMOLACHA	250.13
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00				
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00				
REMOLACHA	86910.06	29.08	2565.51	2689.00	-103.49					
2022	CEBADA REGADIO	2992.39	318.00	951.58	896.00	55.58	2022	CEBADA REGADIO	171.98	
	CEBADA SECANO	1299.89	318.00	413.36	397.00	16.36		TRIGO REGADIO	226.32	
	TRIGO REGADIO	3439.70	334.00	1148.86	1090.00	58.86		GIRASOL REGADIO	278.05	
	TRIGO SECANO	1693.74	334.00	565.71	532.00	33.71			CÁRTAMO REGADIO	625.36
	GIRASOL REGADIO	2489.38	710.00	1753.26	1590.00	163.26		CÁRTAMO SECANO	80.00	
	GIRASOL SECANO	981.50	710.00	696.86	580.00	136.86			REMOLACHA	329.28
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00				
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00				
REMOLACHA	90000.00	32.97	2967.30	2995.00	-27.70					
2023	CEBADA REGADIO	3310.98	230.00	761.53	696.00	65.53	2023	CEBADA REGADIO	172.13	
	CEBADA SECANO	1588.75	230.00	360.81	357.00	3.81		TRIGO REGADIO	173.25	
	TRIGO REGADIO	3311.14	252.00	834.41	820.00	14.41		GIRASOL REGADIO	203.01	
	TRIGO SECANO	1750.86	252.00	441.22	402.00	39.22			CÁRTAMO REGADIO	644.66
	GIRASOL REGADIO	2583.00	385.00	994.46	901.00	93.46		CÁRTAMO SECANO	80.00	
	GIRASOL SECANO	900.00	385.00	346.50	352.00	-5.50			REMOLACHA	344.31
	CÁRTAMO REGADIO	0.00		800.00	350.00	450.00				
	CÁRTAMO SECANO	0.00		200.00	120.00	80.00				
REMOLACHA	92113.99	29.29	2698.02	2701.00	-2.98					

Tabla 78: Desglose económico del escenario pesimista de una supuesta reducción del 10 % en la producción por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “Producción (Kg/Ha)” se ve multiplicada por 0.9 respecto al caso base. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenido en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$\begin{aligned}
 \text{Ec67.} \quad (N = & 46.16 * S_1 + 15.04 * S_2 + 109.40 * S_3 + 45.30 * S_4 + \\
 & 168.55 * S_5 + 9.6 * S_6 + 450 * S_7 + 80 * S_8 + 101.31 * S_9 + \\
 & 157.53 * S_{10} + 269.39 * S_{11} + 280.70 * S_{12} + 628.9 * S_{13} + \\
 & 451.31 * S_{14})
 \end{aligned}$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$\text{Ec68.} \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$\text{Ec69.} \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

$$\begin{aligned}
 \text{Ec70.} \quad (& 1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * \\
 & S_{13} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)
 \end{aligned}$$

- Costos de producción:
 - Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los costos.

Costos de producción									
Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los costos.									
RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR		
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	490.80	56.24	2020	CEBADA REGADIO	167.62
	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	239.80	19.14		TRIGO REGADIO	287.51
	TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	590.48	127.52		GIRASOL REGADIO	307.22
	TRIGO SECANO	1967.87	170.00	334.54	281.36	53.18		CÁRTAMO REGADIO	593.90
	GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	968.17	771.10	195.07		REMOLACHA	485.97
	GIRASOL SECANO	987.44	345.00	340.67	326.70	13.97			
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	385.00	415.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	132.00	68.00			
REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2317.70	135.97				
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	633.60	22.36	2021	CEBADA REGADIO	136.51
	CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	348.70	2.73		TRIGO REGADIO	218.93
	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	848.38	792.00	54.38		GIRASOL REGADIO	244.64
	TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	405.90	28.78		CÁRTAMO REGADIO	598.30
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1310.10	131.21		REMOLACHA	268.51
	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	418.00	133.39			
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	385.00	415.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	132.00	68.00			
REMOLACHA	96788.98	29.08	2872.78	2957.90	-85.12				
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	985.80	71.71	2022	CEBADA REGADIO	188.12
	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	436.70	22.59		TRIGO REGADIO	246.97
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1278.51	1199.00	77.51		GIRASOL REGADIO	313.85
	TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	585.20	43.36		CÁRTAMO REGADIO	590.36
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1749.00	199.07		REMOLACHA	359.48
	GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	616.00	158.29			
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	385.00	415.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	132.00	68.00			
REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	3294.50	2.50				
2023	CEBADA REGADIO	3678.67	230.00	846.14	765.60	80.54	2023	CEBADA REGADIO	187.14
	CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	392.70	8.20		TRIGO REGADIO	183.96
	TRIGO REGADIO	3679.04	252.00	927.12	902.00	25.12		GIRASOL REGADIO	223.41
	TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	442.20	48.04		CÁRTAMO REGADIO	609.66
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	991.10	113.85		REMOLACHA	373.99
	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	387.20	-2.20			
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	385.00	415.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	132.00	68.00			
REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2971.10	26.70				

Tabla 79: Desglose económico del escenario pesimista de un supuesto aumento del 10 % en los costos por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “Coste (€/Ha)” se ve multiplicada por 1.1 respecto al caso base. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenido en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$Ec71. \quad (N = 56.24 * S_1 + 19.14 * S_2 + 127.52 * S_3 + 53.18 * S_4 + 195.07 * S_5 + 13.97 * S_6 + 415 * S_7 + 68 * S_8 + 135.97 * S_9 + 167.62 * S_{10} + 287.51 * S_{11} + 307.22 * S_{12} + 593.9 * S_{13} + 485.97 * S_{14})$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec72. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec73. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

$$Ec74. \quad (1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * S_{13} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)$$

- Escenario optimista: Reducción del 10 % en los costos.

Costos de producción									
Escenario optimista: Reducción del 10 % en los costos.									
RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR		
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	401.40	145.44	2020	CEBADA REGADIO	258.82
	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	198.20	62.74		TRIGO REGADIO	394.87
	TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	483.12	234.88		GIRASOL REGADIO	447.42
	TRIGO SECANO	1987.87	170.00	334.54	230.20	104.34			
	GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	966.17	630.90	335.27		CÁRTAMO REGADIO	683.90
	GIRASOL SECANO	987.44	345.00	340.67	267.30	73.37			
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	315.00	485.00		REMOLACHA	907.37
	CÁRTAMO SECANO			200.00	108.00	92.00			
REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	1896.30	557.37				
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	518.40	137.56	2021	CEBADA REGADIO	251.71
	CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	285.30	66.13		TRIGO REGADIO	382.93
	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	848.38	648.00	198.38			
	TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	332.10	102.58		GIRASOL REGADIO	482.84
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1071.90	369.41			
	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	342.00	209.39		CÁRTAMO REGADIO	688.30
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	315.00	485.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	108.00	92.00		REMOLACHA	808.31
REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2420.10	452.68				
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	808.40	250.91	2022	CEBADA REGADIO	387.32
	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	357.30	101.99		TRIGO REGADIO	484.97
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1276.51	981.00	295.51			
	TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	478.80	149.76		GIRASOL REGADIO	631.85
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1431.00	517.07			
	GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	504.00	270.29		CÁRTAMO REGADIO	680.36
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	315.00	485.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	108.00	92.00		REMOLACHA	958.48
REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2895.50	601.50				
2023	CEBADA REGADIO	3878.87	230.00	848.14	628.40	219.74	2023	CEBADA REGADIO	328.34
	CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	321.30	79.60		TRIGO REGADIO	347.96
	TRIGO REGADIO	3879.04	252.00	927.12	738.00	189.12			
	TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	381.80	128.44		GIRASOL REGADIO	403.61
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	810.90	294.05			
	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	318.80	66.20		CÁRTAMO REGADIO	679.66
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	315.00	485.00			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	108.00	92.00		REMOLACHA	914.19
REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2430.90	566.90				

Tabla 80: Desglose económico del escenario optimista de una supuesta reducción del 10 % en los costos por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “Coste (€/Ha)” se ve multiplicada por 0.9 respecto al caso base. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenido en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$Ec75. \quad (N = 145.44 * S_1 + 62.74 * S_2 + 234.88 * S_3 + 104.34 * S_4 + 335.27 * S_5 + 73.37 * S_6 + 485 * S_7 + 92 * S_8 + 557.37 * S_9 + 256.82 * S_{10} + 394.87 * S_{11} + 447.42 * S_{12} + 663.9 * S_{13} + 907.37 * S_{14})$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec76. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec77. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

$$Ec78. \quad (1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 3028.88 * S_{13} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)$$

- Necesidades hídricas:
 - Escenario pesimista: Aumento del 10 % en la disponibilidad de agua.

Necesidades hídricas

Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los m3 de agua suministrados.

RED ELÉCTRICA							ENERGÍA SOLAR		
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	548.84	457.14	89.71	2020	CEBADA REGADIO	212.22
	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	218.00	40.94		TRIGO REGADIO	341.19
	TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	552.80	165.20		GIRASOL REGADIO	377.32
	TRIGO SECANO	1967.87	170.00	334.54	255.78	78.76			
	GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	968.17	712.22	253.95		CÁRTAMO REGADIO	628.90
	GIRASOL SECANO	967.44	345.00	340.67	297.00	43.67		REMOLACHA	696.67
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	367.89	432.11			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2142.00	311.67				
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	587.41	68.55	2021	CEBADA REGADIO	194.11
	CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	317.00	34.43		TRIGO REGADIO	290.93
	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	848.38	738.46	109.92		GIRASOL REGADIO	363.74
	TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	369.00	65.68			
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1202.34	238.97		CÁRTAMO REGADIO	633.30
	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	380.00	171.39		REMOLACHA	537.41
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	368.33	431.67			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2724.36	148.42				
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	907.84	149.67	2022	CEBADA REGADIO	277.72
	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	397.00	62.29		TRIGO REGADIO	355.97
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1278.51	1108.95	169.57		GIRASOL REGADIO	472.85
	TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	532.00	96.56			
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1601.48	346.59		CÁRTAMO REGADIO	625.36
	GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	560.00	214.29		REMOLACHA	658.98
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	367.54	432.46			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	3030.70	266.30				
2023	CEBADA REGADIO	3678.87	230.00	848.14	708.66	139.48	2023	CEBADA REGADIO	258.74
	CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	357.00	43.90		TRIGO REGADIO	265.96
	TRIGO REGADIO	3879.04	252.00	927.12	835.88	91.23		GIRASOL REGADIO	313.51
	TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	402.00	88.24			
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	911.96	192.99		CÁRTAMO REGADIO	644.86
	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	352.00	33.00		REMOLACHA	644.09
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	369.47	430.53			
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00			
REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2735.73	262.07				

Tabla 81: Desglose económico del escenario pesimista de un supuesto aumento del 10 % en las necesidades hídricas por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Escenario pesimista: Aumento del 10 % en los m3 de agua suministrados.				
AÑO	CULTIVO	DOSIS (m3/ha)	€/m3	COSTE RIEGO (€/ha)
2020	CEBADA REGADIO	2074.19	0.059	122.51
	TRIGO REGADIO	2979.67	0.059	175.99
	GIRASOL REGADIO	2088.66	0.059	123.37
	CÁRTAMO REGADIO	3331.77	0.059	196.79
	REMOLACHA	6518.24	0.059	385.00
2021	CEBADA REGADIO	2125.85	0.059	125.56
	TRIGO REGADIO	3064.52	0.059	181.01
	GIRASOL REGADIO	2112.47	0.059	124.77
	CÁRTAMO REGADIO	3413.78	0.059	201.64
	REMOLACHA	6585.71	0.059	388.99
2022	CEBADA REGADIO	2167.85	0.059	128.04
	TRIGO REGADIO	3155.88	0.059	186.40
	GIRASOL REGADIO	2137.70	0.059	126.26
	CÁRTAMO REGADIO	3265.82	0.059	192.90
	REMOLACHA	6648.28	0.059	392.68
2023	CEBADA REGADIO	1985.35	0.059	117.26
	TRIGO REGADIO	2958.21	0.059	174.73
	GIRASOL REGADIO	2040.34	0.059	120.51
	CÁRTAMO REGADIO	3625.31	0.059	214.13
	REMOLACHA	6467.81	0.059	382.02

Tabla 82: Resultados de un aumento del 10% en las necesidades hídricas anuales registradas en m3/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “DOSIS (m3/ha)” se ve multiplicada por 1.1 respecto al caso base. Esto modifica el coste riego en € por hectárea, que incrementa la columna de “COSTE RIEGO (€/Ha)” y disminuye la columna de “Beneficios (€/Ha)”. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenidos en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo y las dosis en m3 por hectárea para reajustar los coeficientes de la restricción de disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$\begin{aligned}
 \text{Ec79.} \quad (N = & 89.71 * S_1 + 40.94 * S_2 + 165.20 * S_3 + 78.76 * S_4 + \\
 & 253.95 * S_5 + 43.67 * S_6 + 432.11 * S_7 + 80 * S_8 + 311.67 * \\
 & S_9 + 212.22 * S_{10} + 341.19 * S_{11} + 377.32 * S_{12} + 628.90 * \\
 & S_{13} + 696.67 * S_{14})
 \end{aligned}$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$\text{Ec80.} \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$\text{Ec81.} \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

$$\begin{aligned}
 \text{Ec82.} \quad (2074.19 * S_{10} + 2979.67 * S_{11} + 2088.66 * S_{12} + 3331.77 * S_{13} + \\
 6518.24 * S_{14} \leq 336625.138)
 \end{aligned}$$

- Escenario pesimista: Reducción del 10 % en la disponibilidad de agua.

Necesidades hídricas									
Escenario optimista: Reducción del 10 % en los m ³ de agua suministrados.									
RED ELÉCTRICA						ENERGÍA SOLAR			
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	434.86	111.98	2020	CEBADA REGADIO	212.22
	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	218.00	40.94		TRIGO REGADIO	341.19
	TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	520.80	197.19		TRIGO SECANO	78.78
	TRIGO SECANO	1967.87	170.00	334.54	255.78	78.78		GIRASOL REGADIO	377.32
	GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	966.17	689.78	276.38		GIRASOL SECANO	43.67
	GIRASOL SECANO	987.44	345.00	340.67	297.00	43.67		CÁRTAMO REGADIO	628.90
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	332.11	467.89		CÁRTAMO SECANO	80.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00		REMOLACHA	696.67
REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2072.00	381.67				
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	584.59	91.38	2021	CEBADA REGADIO	194.11
	CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	317.00	34.43		TRIGO REGADIO	290.93
	TRIGO REGADIO	4068.77	207.00	846.38	703.54	142.83		TRIGO SECANO	85.68
	TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	389.00	65.68		GIRASOL REGADIO	363.74
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1179.66	261.65		GIRASOL SECANO	171.39
	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	380.00	171.39		CÁRTAMO REGADIO	633.30
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	331.67	468.33		CÁRTAMO SECANO	80.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00		REMOLACHA	537.41
REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2653.64	219.15				
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	884.36	172.95	2022	CEBADA REGADIO	277.72
	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	397.00	62.29		TRIGO REGADIO	355.97
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1278.51	1073.05	203.46		TRIGO SECANO	96.58
	TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	532.00	96.58		GIRASOL REGADIO	472.85
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1578.52	369.55		GIRASOL SECANO	214.29
	GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	580.00	214.29		CÁRTAMO REGADIO	625.36
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	332.46	467.54		CÁRTAMO SECANO	80.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00		REMOLACHA	658.98
REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2959.30	337.70				
2023	CEBADA REGADIO	3878.87	230.00	846.14	685.34	160.80	2023	CEBADA REGADIO	258.74
	CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	357.00	43.90		TRIGO REGADIO	265.96
	TRIGO REGADIO	3879.04	252.00	927.12	804.12	123.00		TRIGO SECANO	88.24
	TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	402.00	88.24		GIRASOL REGADIO	313.51
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	890.04	214.91		GIRASOL SECANO	33.00
	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	352.00	33.00		CÁRTAMO REGADIO	644.66
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	330.53	469.47		CÁRTAMO SECANO	80.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00		REMOLACHA	644.09
REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2666.27	331.53				

Tabla 83: Desglose económico del escenario optimista de una supuesta reducción del 10 % en las necesidades hídricas por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Escenario optimista: Reducción del 10 % en los m3 de agua suministrados.				
AÑO	CULTIVO	DOSIS (m3/ha)	€/m3	COSTE RIEGO (€/ha)
2020	CEBADA REGADIO	1697.07	0.059	100.24
	TRIGO REGADIO	2437.91	0.059	144.00
	GIRASOL REGADIO	1708.90	0.059	100.94
	CÁRTAMO REGADIO	2725.99	0.059	161.01
	REMOLACHA	5333.10	0.059	315.00
2021	CEBADA REGADIO	1739.33	0.059	102.73
	TRIGO REGADIO	2507.34	0.059	148.10
	GIRASOL REGADIO	1728.39	0.059	102.09
	CÁRTAMO REGADIO	2793.10	0.059	164.97
	REMOLACHA	5388.31	0.059	318.26
2022	CEBADA REGADIO	1773.69	0.059	104.76
	TRIGO REGADIO	2582.08	0.059	152.51
	GIRASOL REGADIO	1749.02	0.059	103.31
	CÁRTAMO REGADIO	2672.04	0.059	157.82
	REMOLACHA	5439.50	0.059	321.28
2023	CEBADA REGADIO	1624.37	0.059	95.94
	TRIGO REGADIO	2420.35	0.059	142.96
	GIRASOL REGADIO	1669.37	0.059	98.60
	CÁRTAMO REGADIO	2966.17	0.059	175.20
	REMOLACHA	5291.85	0.059	312.56

Tabla 84: Resultados de una reducción del 10% en las necesidades hídricas anuales registradas en m3/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

En este supuesto, la columna de “DOSIS (m3/ha)” se ve multiplicada por 0.9 respecto al caso base. Esto modifica el coste riego en € por hectárea, que disminuye la columna de “COSTE RIEGO (€/Ha)” e incrementa la columna de “Beneficios (€/Ha)”. Posteriormente se emplearon los beneficios por hectárea obtenidos en euros como los coeficientes de nuestra función objetivo y las dosis en m3 por hectárea para reajustar los coeficientes de la restricción de disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable. Lo ejemplificamos con la campaña de 2020.

Campaña 2020:

Función objetivo:

$$Ec83. \quad (N = 111.98 * S_1 + 40.94 * S_2 + 197.19 * S_3 + 78.76 * S_4 + 276.38 * S_5 + 43.67 * S_6 + 467.89 * S_7 + 80 * S_8 + 381.67 * S_9 + 212.22 * S_{10} + 341.19 * S_{11} + 377.32 * S_{12} + 628.90 * S_{13} + 696.67 * S_{14})$$

Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec84. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_7 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} \leq 290)$$

- Superficie disponible en cultivos de secano:

$$Ec85. \quad (S_2 + S_4 + S_6 + S_8 \leq 510)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable

$$Ec86. \quad (1697.07 * S_{10} + 2437.91 * S_{11} + 1708.90 * S_{12} + 2725.99 * S_{13} + 5333.10 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Anexo 4

Para calcular los resultados promedio esperados según con lo visto en el Capítulo 3, en el apéndice 3 de “Escenario de implementación y resultados esperados”, hemos realizado los siguientes cálculos.

En primer lugar, estos son los datos que emplearemos para realizar nuestros cálculos:

RED ELÉCTRICA						
AÑO	CULTIVO	Kg/Ha	Precio/Tn	Ingreso/Ha	Coste/Ha	Beneficio/Ha
2020	CEBADA REGADIO	3771.34	145.00	546.84	446.00	100.84
	CEBADA SECANO	1785.76	145.00	258.94	218.00	40.94
	TRIGO REGADIO	4223.50	170.00	718.00	536.80	181.20
	TRIGO SECANO	1967.87	170.00	334.64	255.78	78.78
	GIRASOL REGADIO	2800.49	345.00	966.17	701.00	265.17
	GIRASOL SECANO	987.44	345.00	340.67	297.00	43.67
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2107.00	346.67	
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	576.00	79.96
	CEBADA SECANO	1820.88	193.00	351.43	317.00	34.43
	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	846.38	720.00	126.38
	TRIGO SECANO	2099.89	207.00	434.68	369.00	65.68
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1191.00	250.31
	GIRASOL SECANO	1070.66	515.00	551.39	380.00	171.39
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2689.00	183.78	
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	896.00	161.31
	CEBADA SECANO	1444.32	318.00	459.29	397.00	62.29
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1276.51	1090.00	186.51
	TRIGO SECANO	1881.93	334.00	628.56	532.00	96.56
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1590.00	358.07
	GIRASOL SECANO	1090.55	710.00	774.29	560.00	214.29
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2995.00	302.00	
2023	CEBADA REGADIO	3678.87	230.00	846.14	696.00	150.14
	CEBADA SECANO	1743.05	230.00	400.90	357.00	43.90
	TRIGO REGADIO	3679.04	252.00	927.12	820.00	107.12
	TRIGO SECANO	1945.40	252.00	490.24	402.00	88.24
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	901.00	203.95
	GIRASOL SECANO	1000.00	385.00	385.00	352.00	33.00
	CÁRTAMO REGADIO			800.00	350.00	450.00
	CÁRTAMO SECANO			200.00	120.00	80.00
REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2701.00	296.80	

Tabla 85: Datos históricos de las producciones, costes y beneficios promedio por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

ENERGÍA SOLAR											
AÑO	CULTIVO	Beneficio/Ha	AÑO	CULTIVO	Beneficio/Ha	AÑO	CULTIVO	Beneficio/Ha	AÑO	CULTIVO	Beneficio/Ha
2020	CEBADA REGADIO	212.22	2021	CEBADA REGADIO	194.11	2022	CEBADA REGADIO	277.72	2023	CEBADA REGADIO	256.74
	TRIGO REGADIO	341.19		TRIGO REGADIO	290.93		TRIGO REGADIO	365.97		TRIGO REGADIO	265.96
	GIRASOL REGADIO	377.32		GIRASOL REGADIO	363.74		GIRASOL REGADIO	472.85		GIRASOL REGADIO	313.51
	CÁRTAMO REGADIO	628.90		CÁRTAMO REGADIO	633.30		CÁRTAMO REGADIO	625.36		CÁRTAMO REGADIO	644.66
	REMOLACHA	696.67		REMOLACHA	537.41		REMOLACHA	658.98		REMOLACHA	644.09

Tabla 86: Datos históricos de los beneficios promedio por cultivo de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

AÑO	2020	2021	2022	2023
CULTIVO	DOSIS (m3/ha)			
CEBADA REGADIO	1885.63	1932.59	1970.77	1804.86
TRIGO REGADIO	2708.79	2785.93	2868.98	2689.28
GIRASOL REGADIO	1898.78	1920.43	1943.36	1854.85
CÁRTAMO REGADIO	3028.88	3103.44	2968.93	3295.74
REMOLACHA	5925.67	5987.01	6043.89	5879.83

Tabla 87: Necesidades hídricas anuales promedio registradas en m3/ha en las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Calcularemos una media de su beneficio neto por hectárea incluyendo todos los cultivos compatibles con su correspondiente tipología de superficie ($B_{\text{categoría superficie por ha}}$ en €/ha).

Ec87.
$$(B_{\text{categoría superficie por ha}} = \frac{B_{\text{cultivo 1}} + B_{\text{cultivo 2}} + \dots + B_{\text{cultivo j}}}{j})$$

Siendo $B_{\text{cultivo 1}}, B_{\text{cultivo 2}}, \dots, B_{\text{cultivo j}}$, el beneficio neto por hectárea en € de cada cultivo j de su correspondiente categoría de superficie.

En el caso del beneficio neto promedio por campaña de la superficie de secano (B_{secano} en €) se calcula como:

Ec88.
$$(B_{\text{secano}} = B_{\text{secano por ha}} * 510)$$

En el caso del beneficio neto promedio por campaña de la superficie de energía solar (B_{solar} en €) se calcula como:

$$Ec89. \quad (B_{solar} = B_{solar \text{ por ha}} * S_{solar})$$

$$Ec90. \quad (S_{solar} = \frac{336625.138 * j}{N_{cultivo 1} + \dots + N_{cultivo j}})$$

Donde S_{solar} es la superficie media en hectáreas suministrada por energía solar que podría ser sembrada en dicha campaña con el promedio de las necesidades hídricas de los j cultivos ($N_{cultivo 1}, \dots, N_{cultivo j}$ en m³/ha).

En el caso del beneficio neto promedio por campaña de la superficie de red solar (B_{red} en €) se calcula como:

$$Ec91. \quad (B_{red} = B_{red \text{ por ha}} * S_{red})$$

$$Ec92. \quad (S_{red} = 290 - S_{solar})$$

Siendo S_{solar} es la superficie media en hectáreas suministrada por la red eléctrica que podría ser sembrada en dicha campaña.

Finalmente, tras realizar esta serie de cálculos obtuvimos los siguientes resultados para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023:

RESULTADOS PROMEDIO ESPERADOS				
AÑO	SUMINISTRO	BENEFICIO PROMEDIO (€/ha)	SUPERFICIE PROMEDIO (ha)	BENEFICIO PROMEDIO TOTAL (€)
2020	SECANO	60.84	520.00	31636.79
	RED ELÉCTRICA	268.78	181.04	48660.29
	ENERGÍA SOLAR	451.26	108.96	49167.56
2021	SECANO	87.87	520.00	45694.61
	RED ELÉCTRICA	218.09	182.99	39908.68
	ENERGÍA SOLAR	403.90	107.01	43219.12
2022	SECANO	113.29	520.00	58909.35
	RED ELÉCTRICA	291.58	183.45	53488.80
	ENERGÍA SOLAR	478.18	106.55	50951.75
2023	SECANO	61.29	520.00	31868.50
	RED ELÉCTRICA	241.60	181.58	43870.71
	ENERGÍA SOLAR	424.99	108.42	46076.47

Tabla 88: Resultados promedio esperados para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

Anexo 5

En continuación al Capítulo 6, veremos cómo implementar nuestro modelo matemático para obtener el segundo cultivo más rentable en superficie de regadío si excluimos al cultivo del cártamo. Tomaremos como base de datos los siguientes históricos de los cultivos de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023:

RED ELÉCTRICA						
AÑO	CULTIVO	Producción (Kg/Ha)	Precio (€/Tn)	Ingreso (€/Ha)	Coste (€/Ha)	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA	3771.34	145.00	546.84	446.00	100.84
	TRIGO	4223.50	170.00	718.00	536.80	181.20
	GIRASOL	2800.49	345.00	966.17	701.00	265.17
	REMOLACHA	97021.45	25.29	2453.67	2107.00	346.67
2021	CEBADA REGADIO	3398.77	193.00	655.96	576.00	79.96
	TRIGO REGADIO	4088.77	207.00	846.38	720.00	126.38
	GIRASOL REGADIO	2798.66	515.00	1441.31	1191.00	250.31
	REMOLACHA	98788.98	29.08	2872.78	2689.00	183.78
2022	CEBADA REGADIO	3324.88	318.00	1057.31	896.00	161.31
	TRIGO REGADIO	3821.89	334.00	1276.51	1090.00	186.51
	GIRASOL REGADIO	2743.76	710.00	1948.07	1590.00	358.07
	REMOLACHA	100000.00	32.97	3297.00	2995.00	302.00
2023	CEBADA REGADIO	3678.87	230.00	846.14	696.00	150.14
	TRIGO REGADIO	3679.04	252.00	927.12	820.00	107.12
	GIRASOL REGADIO	2870.00	385.00	1104.95	901.00	203.95
	REMOLACHA	102348.88	29.29	2997.80	2701.00	296.80

Tabla 89: Datos históricos de las producciones, costes y beneficios promedio por cultivo regados usando la red eléctrica de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Elaboración propia. (2024).

ENERGÍA SOLAR											
AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)	AÑO	CULTIVO	Beneficio (€/Ha)
2020	CEBADA	212.22	2021	CEBADA	194.11	2022	CEBADA	277.72	2023	CEBADA	256.74
	TRIGO	341.19		TRIGO	290.93		TRIGO	355.97		TRIGO	265.96
	GIRASOL	377.32		GIRASOL	363.74		GIRASOL	472.85		GIRASOL	313.51
	REMOLACHA	696.67		REMOLACHA	537.41		REMOLACHA	658.98		REMOLACHA	644.09

Tabla 90: Datos históricos de los beneficios promedio por cultivo regados usando la energía solar de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia.

(2024).

Así se ejecutó nuestro modelo matemático a través de la de la programación lineal en Matlab excluyendo el cultivo del cártamo para las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

Campaña 2020:

- Función objetivo:

$$Ec93. \quad (N = 100.84 * S_1 + 181.19 * S_3 + 265.17 * S_5 + 346.67 * S_9 + 212.22 * S_{10} + 341.19 * S_{11} + 377.32 * S_{12} + 696.67 * S_{14})$$

- Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec94. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{14} \leq 290)$$

-- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec95. \quad (1885.63 * S_{10} + 2708.79 * S_{11} + 1898.78 * S_{12} + 5925.67 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Campaña 2021:

- Función objetivo:

$$Ec96. \quad (N = 79.96 * S_1 + 126.37 * S_3 + 250.31 * S_5 + 183.78 * S_9 + 194.11 * S_{10} + 290.93 * S_{11} + 363.74 * S_{12} + 537.41 * S_{14})$$

- Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec97. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{14} \leq 290)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec98. \quad (1932.59 * S_{10} + 2785.93 * S_{11} + 1920.43 * S_{12} + 5987.01 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Campaña 2022:

- Función objetivo:

$$Ec99. \quad (N = 161.31 * S_1 + 186.51 * S_3 + 358.07 * S_5 + 302 * S_9 + 277.72 * S_{10} + 355.96 * S_{11} + 472.85 * S_{12} + 658.98 * S_{14})$$

- Restricciones:

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec100. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{14} \leq 290)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec101. \quad (1970.77 * S_{10} + 2868.98 * S_{11} + 1943.36 * S_{12} + 6043.89 * S_{14} \leq 336625.138)$$

Campaña 2023:

- Función objetivo:

$$Ec102. \quad (N = 150.14 * S_1 + 107.12 * S_3 + 203.95 * S_5 + 296.8 * S_9 + 256.74 * S_{10} + 265.96 * S_{11} + 313.51 * S_{12} + 644.09 * S_{14})$$

- **Restricciones:**

- Superficie disponible en cultivos de regadío:

$$Ec103. \quad (S_1 + S_3 + S_5 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} + S_{14} \leq 290)$$

- Disponibilidad anual de agua extraída con energía renovable:

$$Ec104. \quad (1804.86 * S_{10} + 2689.28 * S_{11} + 1854.85 * S_{12} + 5879.83 * S_{14} \leq 336625.138)$$

AÑO	SUMINISTRO	CULTIVO	HA	Ingreso(€)	Coste (€)	Beneficio Neto (€)	Necesidades hídricas (m3)
2020	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	233.19	572171.88	491331.33	80840.55	1381806.99
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	56.81	139393.13	99815.17	39577.96	336637.31
2021	RED ELÉCTRICA	GIRASOL	114.71	165332.66	136619.61	28713.05	220292.53
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL	175.29	252647.21	188887.19	63760.02	336632.17
2022	RED ELÉCTRICA	GIRASOL	116.78	227495.57	185680.20	41815.37	226945.58
	ENERGÍA SOLAR	GIRASOL	173.22	337444.62	255536.80	81907.81	336628.82
2023	RED ELÉCTRICA	REMOLACHA	232.75	697737.65	628657.75	69079.90	1368530.43
	ENERGÍA SOLAR	REMOLACHA	57.25	171623.98	134749.76	36874.22	336620.27

Tabla 91: Resultados obtenidos para cada cultivo seleccionado tras optimizar, sin el cártamo, los beneficios de la explotación de las campañas agrícolas de 2020, 2021, 2022 y 2023. Elaboración propia. (2024).

Anexo 6

Para calcular el número de hectáreas que corresponderían a cada tipología de superficie empleamos las necesidades hídricas promedio por cultivo de las campañas de 2020, 2021, 2022 y 2023.

NECESIDADES HÍDRICAS PROMEDIO DE LAS CAMPAÑAS DE 2020-2023	
CULTIVO	DOSIS (m ³ /ha)
CEBADA	1898.4625
TRIGO	2763.245
CÁRTAMO	3099.2475
GIRASOL	1904.355
REMOLACHA	5959.1

Tabla 92: Necesidades hídricas promedio en los cultivos de secano de las campañas de 2020 a 2023. Elaboración propia. (2024).

Si dividimos el agua total disponible suministrada por energía solar entre el consumo hídrico promedio por hectárea de cada cultivo obtenemos las hectáreas disponibles para cada cultivo.

Ec105.

$$(S = \frac{336625.138}{N_i})$$

Siendo N_i las necesidades hídricas del cultivo i (m³/ha) y S la superficie regada a través de energía solar disponible para cada cultivo (ha).

SUPERFICIE PROMEDIO DISPONIBLE POR CULTIVO	
REGADÍO SUMINISTRADO POR ENERGÍA SOLAR	
CULTIVO	HECTÁREAS
CEBADA	177.31
TRIGO	121.82
CÁRTAMO	108.62
GIRASOL	176.77
REMOLACHA	56.49

*Tabla 93: Superficie promedio suministrada por energía solar disponible por cultivo.
Elaboración propia. (2024).*

Finalmente, para elaborar nuestro plan de cultivos de acuerdo con el Capítulo 3, debemos tener en consideración que la explotación cuenta con 520 hectáreas de secano y de las 290 hectáreas de regadío las restantes serán suministradas por la red eléctrica.