



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO USO DE DRONES EN UNA PLANTACIÓN AGRÍCOLA

Autor: Alejandra Serrano Ruiz

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Junio 2024

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

“Uso de drones en una plantación agrícola”

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.: Alejandra Serrano Ruiz

Fecha: 13 06 / 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Iñigo Sanz Fernández

Fecha://

SANZ
FERNANDEZ
IÑIGO -
52367115W

Firmado digitalmente
por SANZ FERNANDEZ
IÑIGO - 52367115W
Fecha: 2024.06.13
19:37:24 +02'00'



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO
USO DE DRONES EN UNA PLANTACIÓN
AGRÍCOLA**

Autor: Alejandra Serrano Ruiz

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Junio 2024

USO DE DRONES EN UNA PLANTACIÓN AGRÍCOLA

Autor: Serrano Ruiz, Alejandra.

Director: Sanz Fernández, Iñigo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto estudia la viabilidad de implantar el uso de drones en una finca en España, donde aún son muchos los agricultores que siguen optando por técnicas agrarias tradicionales. Muestra cómo los drones pueden contribuir significativamente al aumento de productividad de una plantación ayudando al agricultor en la toma de decisiones óptimas, resultando un proceso más sostenible y eficiente (mayor productividad utilizando una menor cantidad de insumos). Además, este enfoque se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) al promover prácticas agrícolas que mejoran la eficiencia del uso de recursos, reducen el impacto ambiental y aseguran la sostenibilidad a largo plazo del sector agrícola.

Palabras clave: Dron, Agricultura 4.0, sostenibilidad, productividad, tecnología, Agricultura de precisión.

1. Estado del Arte

La sostenibilidad es crucial en todos los sectores industriales debido a la escasez de recursos y el deterioro ambiental. En concreto, uno de los problemas a abordar es la escasez de agua. La agricultura, que consume el 67% del agua global y depende del riego para el 30-40% de la producción alimentaria (RWTH Aachen University, 2024) , es un área donde la investigación para soluciones a la escasez y creciente demanda resultan esenciales. Una respuesta que lleva en constante desarrollo desde los años 80 es la agricultura de precisión (Flego & García, 2008). Esta ha evolucionado desde el uso de GPS en maquinaria (Agricultura 3.0) hasta tecnologías avanzadas como drones y análisis de Big Data (Agricultura 4.0) (Mergar, 2018) .

El uso de drones proporciona a los agricultores datos detallados sobre el estado de sus cultivos, lo que mejora la toma de decisiones y la rentabilidad de la plantación. Los drones permiten un monitoreo frecuente y detallado, identificando mediante cámaras multiespectrales problemas como plagas, estrés hídrico y enfermedades, ayudando a evitar

pérdidas y reduciendo la necesidad de aplicaciones preventivas. También facilitan la gestión eficiente del riego, optimizando el uso del agua y reduciendo costos de producción (Greenfield Technologies, 2024).

Los drones utilizados en la agricultura se encuentran sujetos al Real Decreto 1036/2017, regulación establecida por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) (AESA, 2024), por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto.

2. Definición del Proyecto

Para lograr cumplir con el objetivo principal del estudio de la viabilidad de los drones en una plantación agrícola el proyecto se ha estructurado de la siguiente manera:

Descripción de los drones

Se han considerado 2 drones utilizados en la industria agroalimentaria: el dron *Mavic 2 Enterprise Advanced* y el dron *Phantom 4 Multispectral*, ambos de la empresa China DJI (DJI Enterprise , s.f.).



Ilustración 1. Dron Mavic 2 Enterprise Advanced y dron Phantom 4 multispectral respectivamente. Fuente: DJI enterprise.

El dron *Mavic 2 Enterprise Advanced* integra una cámara de alta resolución con zoom, un sensor térmico FLIR Boson, y un módulo RTK, tecnologías que permiten realizar mapas térmicos y levantamientos topográficos precisos.

El dron *Phantom 4 Multispectral* cuenta con una cámara multispectral de cinco bandas y sistemas de estabilización y posicionamiento preciso, tecnologías que permiten analizar la salud de los cultivos, gestionar la fertilidad del suelo, detectar enfermedades y monitorear el estrés hídrico para aplicaciones de agricultura de precisión.

Datos obtenidos con los drones

En este apartado se introduce la finca sobre la cual, posteriormente se ha analizado la inversión, una plantación de tomates en Talavera la Real, Badajoz.

La empresa Greenfield Technologies, pionera en España en ayudar a que las explotaciones agrarias sean más competitivas y sostenibles mediante el uso de tecnologías de agricultura de precisión, proporcionó datos reales obtenidos con los drones mencionados, durante la campaña de cultivo del tomate. En este apartado se muestran, manipulados mediante el software QGIS, los siguientes datos: el modelo digital del terreno (DTM), índices multiespectrales (NDVI, NIR, RED), imagen RGB e índice térmico. Estos muestran el estado del cultivo, las zonas que sufren de estrés hídrico, posibles plagas o anomalías, y su temperatura, lo que le permite al agricultor gestionar de manera eficiente y localizada el riego, los fertilizantes y en general el estado del cultivo, mejorando su calidad y productividad.

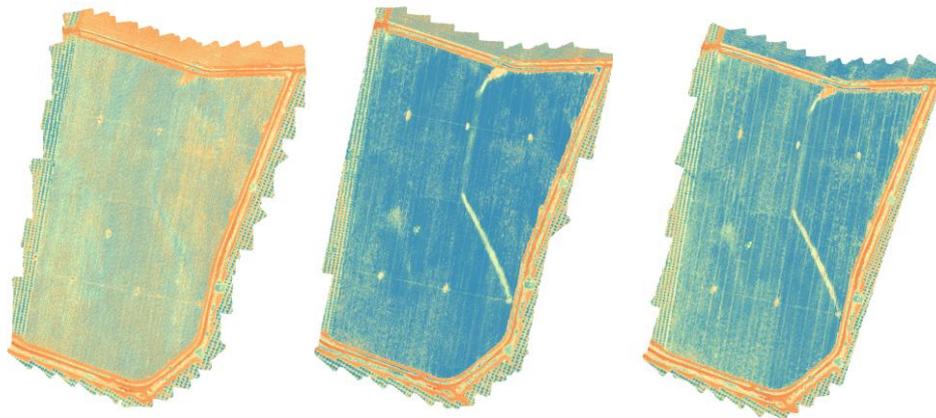


Ilustración 2. Índice NDVI de la parcela en los meses mayo, junio y julio respectivamente. Fuente: datos: (Greenfield Technologies) dron: DJI Phantom 4 multiespectral, elaboración: propia.

Además, en este apartado se ha simulado el vuelo de un dron, para comprender su uso real en el campo. Al mismo tiempo se ha obtenido información valiosa acerca de sus limitaciones en cuanto a autonomía, que resulta uno de los principales inconvenientes para el uso de drones, viendo las discrepancias entre lo dicho por el fabricante y la realidad: con una autonomía de 27 minutos, dependiendo de la distancia a la que se someta el dron con respecto al punto de origen, la duración total del vuelo disminuye considerablemente (en las dos simulaciones hechas, a 21 y 22 minutos).

Estudio económico

El estudio económico se ha realizado en el contexto de la plantación de tomates de Talavera la Real, mediante datos de los ejercicios económicos desde el 2015 hasta el 2022 de distintas fincas representativas en cada región del país, realizados por el Ministerio de Agricultura del Gobierno de España (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España). En concreto los datos utilizados han sido de la comunidad autónoma de Extremadura ya que, en otras regiones como Almería, el cultivo del tomate se hace en invernaderos superintensivos, donde la tecnología de los drones no es aplicable, y por tanto sus datos no son representativos (Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera., 2013).

El estudio económico se ha realizado considerando un margen de aumento de productividad como ingresos, y un margen de reducción de costes directos (insumos) como ahorro. Tras considerar varias fuentes para determinar cuáles son estos márgenes (ya que únicamente se pueden obtener de la experiencia), se ha optado por estudiar que tanto el aumento de productividad como la reducción de costes sean del 15%, según un contacto con años de experiencia en el sector. Con este margen el resultado es que la inversión es extremadamente rentable, con un TIR del 51%, recuperando la inversión en 1 año. Este margen se ha variado y se han estudiado los siguientes escenarios: 1) margen límite de ahorro de insumos y de aumento de productividad, 2) mínimo número de hectáreas para las cuales la inversión es viable y 3) viabilidad de la inversión sin ahorro de insumos o 4) sin aumento de la productividad.

Se ha realizado el estudio en 4 años ya que esta es aproximadamente la vida útil de los drones, que son el activo principal de la inversión (no es una inversión a largo plazo).

3. Resultados y conclusiones

La siguiente gráfica muestra el beneficio que produce el cultivo del tomate para el agricultor.

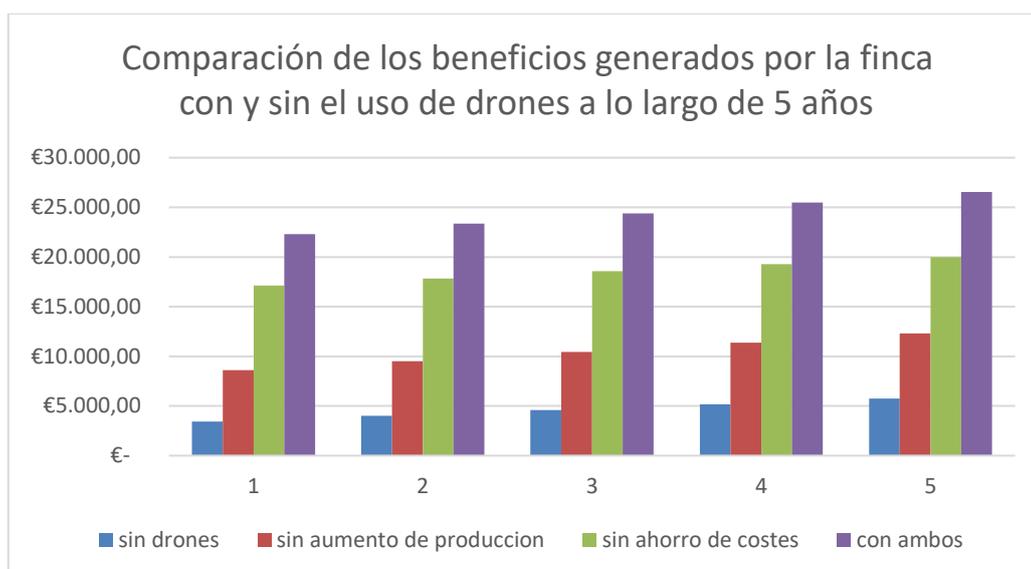


Gráfico 1. Comparación de los beneficios generados por la finca con y sin el uso de drones a lo largo de 5 años. Elaboración propia

La gráfica muestra que el uso de drones produce un aumento significativo de beneficios, si se toman las decisiones correctas para un aumento de productividad (15%) y disminución de insumos (15%). También en la gráfica se aprecia que la contribución más significativa al aumento del beneficio es el aumento de producción por lo que las decisiones del agricultor deben ir enfocadas a evitar pérdidas (detección temprana de plagas, enfermedades o zonas con estrés hídrico).

Los resultados obtenidos en cuanto a los diferentes escenarios mencionados son los recogidos en la siguiente tabla:

Numeración del escenario	Descripción del escenario	Resultado	TIR
1	Aumento de producción y disminución de costes mínimos	12,1%	9%
2	Mínimo número de hectáreas	13,15 ha	9%
3	Aumento de producción mínimo sin disminución de costes	17,15%	9%
4	Disminución de costes mínimo sin aumento de producción	41,1%	9%

Tabla 1. Resultados del estudio económico según los distintos escenarios.

Los distintos resultados del proyecto llevan a la conclusión de que la inversión en los drones para un agricultor de una finca considerable (a partir de las 13,15 hectáreas y dependiendo del cultivo más o menos), resultan una apuesta segura para aumentar el rendimiento de la plantación, mejorar la calidad de los cultivos y aumentar la productividad de la cosecha. Con

pequeñas nociones de los softwares de mapeo como QGIS, y la propia experiencia del campo de los agricultores, los drones son un primer paso sin apenas riesgo hacia la agricultura de precisión.

4. Referencias

Balmes, Florian. RWTH Aachen University. (febrero de 2024). *Introduction to Water Scarcity and Desalination*. Conferencia académica.

Mergar, D. (2018). *Agricultura Digital o Agricultura 4.0*. CENCICANA, Director General. Memoria de presentación de resultados de investigación Zafra 2017 – 2018.

Flego, F., & García, E. (2008). *Agricultura de Precisión*. Artículo científico de la revista "Ciencia y Tecnología" de la Universidad de Palermo.

AESA. (2024). Obtenido de <https://www.seguridadareaa.gob.es/es/ambitos/drones/formacion-de-pilotos-a-distancia-de-uas-drones/formacion-de-pilotos-uas-drones-en-categoria-rabiartar>. Último acceso en 13/06/2024.

Greenfield Technologies. (s.f.). Obtenido de <https://greenfield.farm/monitorizacion-de-cultivos/>. Último acceso en 13/06/2024.

DJI Enterprise . (s.f.). Obtenido de <https://www.dji.com/it/products/enterprise>. Último acceso en 13/06/2024

González Vizcaíno, Antonia. (2013) Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.. *Introducción al cultivo de tomate en invernadero*. Almería: Junta de Andalucía. Citación,: 1-34 (2013). Material docente.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España. (s.f.). *Informe interactivo ECREA 2.0*. Obtenido de: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/financiacion-fiscalidad-estudio-costes/ecrea/powerbi-ECREA.aspx>. Último acceso el 13/06/2024.

USE OF DRONES IN AGRICULTURAL PLANTATIONS

Author: Serrano Ruiz, Alejandra.

Director: Sanz Fernández, Iñigo.

Collaborative Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Project studies the viability of implanting the use of drones in a field in Spain, where many farmers still opt for traditional agricultural techniques. The Project shows how drones can contribute significantly to an increase in productivity of a plantation by helping the farmer in the decision-making process, resulting in a more sustainable and efficient process. It aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) since it promotes agricultural practices that improve the efficiency of resource use, reduce environmental impact and assure long term sustainability of the agricultural sector.

Key words: Drone, Agriculture 4.0, sustainability, productivity, technology, Precision Agriculture.

1. State of the Art

Sustainability is crucial in all industrial sectors due to resource scarcity and the deterioration of the environment. More specifically, one of the issues to be addressed is water scarcity. Agriculture, which consumes around 67% of the total available freshwater and depends on irrigation for 30-40% of food production (RWTH Aachen University, 2024), is an area where research for solutions for scarcity and incipient demand is essential. A response that has been in constant development since the decade of the 80's is precision agriculture (Flego & García, 2008). It has evolved from the use of GPS technology in heavy machinery (Agriculture 3.0) to more advanced technologies like drones and Big Data analysis (Agriculture 4.0) (Mergar, 2018).

The use of drones provides framers with detailed data about the state of the crops, which improves decision-making and therefore the overall profitability of the plantation. Drones enable a frequent and detailed monitoring of the crops, identifying via multispectral cameras issues like plagues, water stress and diseases, helping to avoid losses and reducing the need for preventive applications. They also facilitate irrigation management, optimizing the use of water, and reducing production costs (Greenfield Technologies, 2024).

The use of drones in Spain is regulated by the Real Decreto 1036/2017, established by the Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) (AESA, 2024), which regulates civil use of remote-controlled aircrafts.

2. Project definition

To meet the main goal of studying the viability of drones in an agricultural plantation the project has been structured in the following way:

Description of the drones

Two drones which are used in the industry have been considered: the drone *Mavic 2 Enterprise Advanced* and the drone *Phantom 4 Multispectral*, both from the Chinese company DJI (DJI Enterprise , s.f.).



Illustration 2. Dron Mavic 2 Enterprise Advanced and dron Phantom 4 multispectral respectively. Source: DJI enterprise.

The drone *Mavic 2 Enterprise Advanced*, integrates a high-resolution camera with zoom, a FLIR Boson thermal sensor and a RTK module, technologies that allow for accurate heat mapping and topographic surveys.

The drone *Phantom 4 Multispectral* features a five-band multispectral camera and stabilizing and precise positioning systems, technologies which allow to analyze the health of the crops, manage soil fertility, detect diseases and monitor water stress for precision agriculture applications.

Data obtained with the drones

This section introduces the farm on which the investment has subsequently been analysed, a tomato plantation in Talavera la Real, Badajoz.

The company Greenfield Technologies, a pioneer in Spain in helping farms to be more competitive and sustainable using precision agriculture technologies, provided real data obtained with both of the previously mentioned drones during the tomato cultivation campaign.

In this section, the following data are shown, manipulated using the QGIS software: the digital terrain model (DTM), multispectral indices (NDVI, NIR, RED), RGB image and thermal index. These show the state of the crop, the areas that suffer from water stress, possible pests or anomalies, and its temperature, which allows the farmer to efficiently and locally manage irrigation, fertilizers and in general the state of the crop, improving its quality and productivity

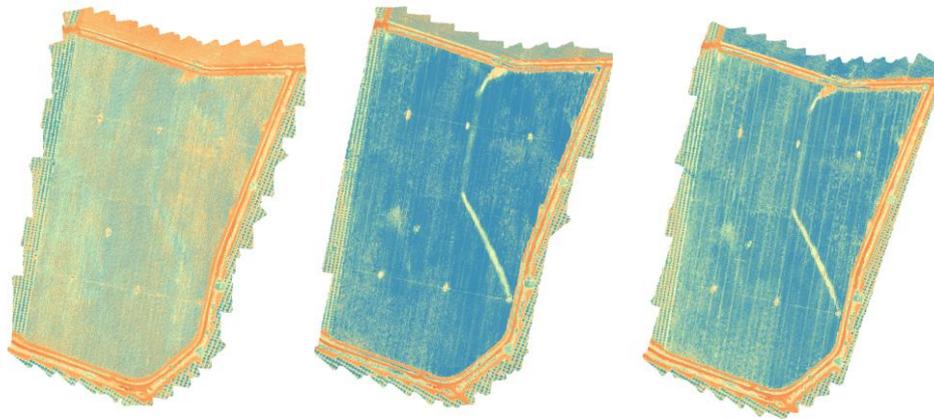


Illustration 2. NDVI index of the plot in May, June, and July respectively. Source: data: (Greenfield Technologies) drone: DJI Phantom 4 Multispectral, elaboration: own.

In addition, in this section the flight of a drone has been simulated, to understand its real use in the field. At the same time, valuable information has been obtained about its limitations in terms of autonomy, which is one of the main drawbacks for the use of drones, seeing the discrepancies between what the manufacturer said and reality: with an autonomy of 27 minutes, depending on the distance to which the drone is subjected to with respect to the point of origin, The total duration of the flight decreases considerably (in the two simulations made, at 21 and 22 minutes).

Economic Study

The economic study has been carried out in the context of the tomato plantation of Talavera la Real, using economic data from 2015 to 2022 from various representative farms in each region of the country, provided by the Ministry of Agriculture of the Government of Spain

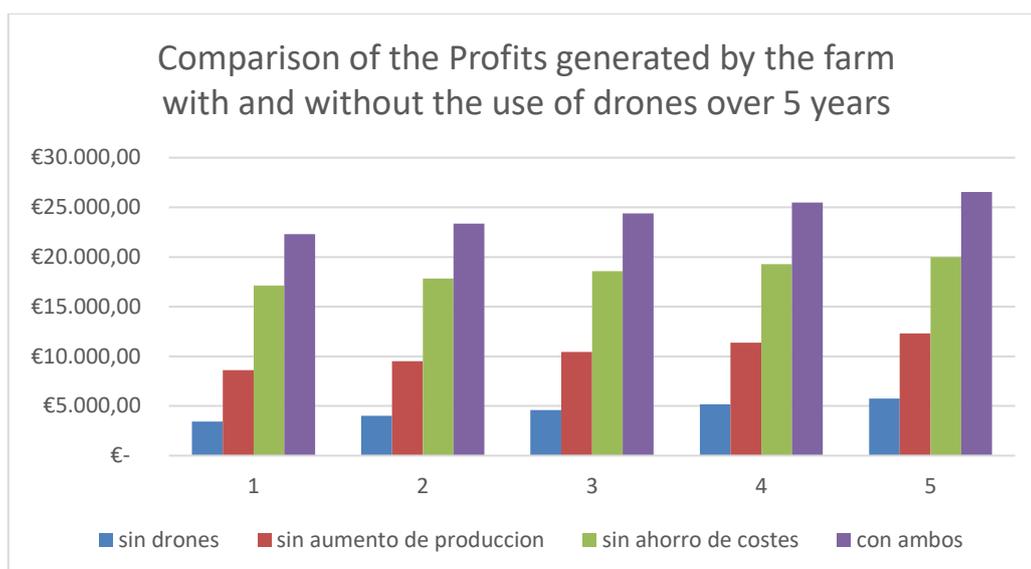
(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España). Specifically, the data used have been from the autonomous community of Extremadura since, in other regions such as Almería, tomato cultivation is done in super-intensive greenhouses, where drone technology is not applicable, and therefore, their data are not representative (Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera., 2013).

The economic study has been conducted considering a margin for increasing productivity as income, and a margin for reducing direct costs (inputs) as savings. After considering various sources to determine these margins (since they can only be obtained through years of experience in the field), it has been decided to study both the increase in productivity and the reduction in costs to be 15%, according to a contact with years of experience in the sector. With this margin the investment is extremely profitable, with an IRR of 51%, and a 2-year payback time. This margin was varied, and the following scenarios were studied: 1) limit margin of input savings and productivity increase, 2) minimum number of hectares for which the investment is viable, and 3) investment viability without input savings or 4) without productivity increase.

The study has been carried out for 4 years (+ the 0 year) since this is approximately the useful life of the drones, which are the main assets of the investment (it is not a long-term investment).

3. Results and conclusions

The following graph shows the profit generated by tomato cultivation for the farmer.



Graph 2. Comparison of the Profits generated by the farm with and without the use of drones over 5 years.

Own elaboration.

The graph shows that the use of drones produces a significant increase in profits, if the right decisions are made for an increase in productivity (15%) and a decrease in inputs (15%). Also, in the graph it can be seen that the most significant contribution to the increase in profit is the increase in production, so the farmer's decisions must be focused on avoiding losses (early detection of pests, diseases or areas with water stress).

The results obtained for the different mentioned scenarios are summarized in the following table:

Scenario Number	Scenario Description	Result	IRR
1	Minimum production increase and cost reduction	12,1%	11%
2	Minimum number of hectares	13,15 ha	9%
3	Minimum production increase without cost reduction	17,15%	9%
4	Minimum cost reduction without production increase	41,1%	9%

Table 2. Results from the different studied scenarios. Own elaboration.

The different results of the project lead to the conclusion that investing in drones for a farmer on a large farm (from 13,15 hectares and depending on the crop more or less), is a safe bet to increase the yield of the plantation, improve the quality of the crops and increase the productivity of the harvest. With small notions of mapping software such as QGIS, and farmers' own experience in the field, drones represent a low-risk initial step towards precision agriculture.

4. References

- Balmes, Florian. RWTH Aachen University. (febrero de 2024). *Introduction to Water Scarcity and Desalination*. Conferencia académica.
- Mergar, D. (2018). *Agricultura Digital o Agricultura 4.0*. CENCICAÑA, Director General. Memoria de presentación de resultados de investigación Zafra 2017 – 2018.
- Flego, F., & García, E. (2008). *Agricultura de Precisión*. Artículo científico de la revista "Ciencia y Tecnología" de la Universidad de Palermo.
- AESA. (2024). Obtenido de <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/formacion-de-pilotos-a-distancia-de-uas-drones/formacion-de-pilotos-uas-drones-en-categoria-rabiartar>. Último acceso en 13/06/2024.
- Greenfield Technologies. (s.f.). Obtenido de <https://greenfield.farm/monitorizacion-de-cultivos/>. Último acceso en 13/06/2024.
- DJI Enterprise . (s.f.). Obtenido de <https://www.dji.com/it/products/enterprise>. Último acceso en 13/06/2024
- González Vizcaíno, Antonia. (2013) Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.. *Introducción al cultivo de tomate en invernadero*. Almería: Junta de Andalucía. Citación,: 1-34 (2013). Material docente.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España. (s.f.). *Informe interactivo ECREA 2.0*. Obtenido de: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/financiacion-fiscalidad-estudio-costes/ecrea/powerbi-ECREA.aspx>. Último acceso el 13/06/2024.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta memoria, quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado a realizar este proyecto, a mi tutor Iñigo Sanz, a las personas de Greenfield Technologies que han estado siempre disponibles para mis dudas, a Gonzalo Murillo por proporcionarme datos y sabiduría del sector, a mi tío Borja por sus contactos en el sector agrícola, y a mi padre por estar siempre dispuesto a aconsejarme en cada paso del proyecto.

Para terminar, agradecer a la Universidad Pontificia de Comillas ICAI por entregarme los conocimientos necesarios para realizar este proyecto.

Índice de la memoria

<i>Índice de gráficos</i>	V
<i>Índice de imágenes</i>	VI
Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Objetivos	9
1.2 Metodología.....	9
Capítulo 2. Justificación del Proyecto y Estado del arte	12
2.1 Agricultura 4.0.....	13
2.2 Papel de los drones en la agricultura 4.0	16
2.3 Justificación del proyecto	18
2.4 Alineación con los objetivos ODS	19
2.5 Normativa del uso de drones en España.....	21
2.6 Conclusiones a cerca de la normativa:	24
Capítulo 3. Descripción técnica de los drones utilizados	25
3.1 DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	25
3.1.1 Ficha técnica del dron:	26
3.1.2 Especificaciones de consumo:	27
3.2 DJI Phantom 4 Multispectral.....	27
3.2.1 Ficha técnica del dron:	28
3.2.2 Especificaciones de consumo:	29
Capítulo 4. Datos obtenidos con los drones	30
4.1 Contexto de la finca y la plantación	30
4.2 Diversidad de los datos.....	32
4.2.1 Metodología.....	37
4.3 Simulación de un vuelo ficticio.....	38
4.3.1 Settings de la simulación:.....	39
4.3.2 Información obtenida con la simulación	40
4.3.3 Conclusiones de la simulación:	46
4.4 Uso práctico de los datos.....	47

Capítulo 5. análisis económico	49
5.1 Decisiones de inversión:.....	49
5.2 Inversión: cálculo del capex	50
5.2.1 Amortización.....	53
5.3 Costes de operación: cálculo del opex.....	54
5.4 Coste total.....	55
5.5 Contexto del ejemplo.....	56
5.6 Aporte económico esperado de la inversión.....	64
5.7 Cuenta de resultados.....	65
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	74
6.1 Margen mínimo de Aumento de rendimiento neto para la rentabilidad de la inversión	74
6.2 Mínimo número de hectáreas para la rentabilidad de la inversión	75
6.3 Sensibilidad al efecto de los drones en el rendimiento de la finca	76
6.4 Sensibilidad al tamaño de la finca.....	77
Capítulo 7. Conclusiones y cuestiones para trabajos futuros.....	79
7.1 Conclusiones principales.....	79
7.2 Conclusiones para trabajos futuros.....	80
7.2.1 Extensión de la agricultura de precisión.....	80
7.2.2 Industria del software.....	81
7.2.3 Limitaciones del proyecto.....	82
Bibliografía	83

Índice de tablas

Tabla 1. Diagrama de Gantt.....	11
Tabla 2. Ficha técnica del Dron DJI Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.).....	26
Tabla 3. Especificaciones de la batería de vuelo inteligente del dron Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	27
Tabla 4. Especificaciones de consumo del control remoto del dron Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	27
Tabla 5. Ficha Técnica del dron Phantom 4 Multiespectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	28
Tabla 6. especificaciones de la batería de vuelo inteligente del dron Phantom 4 Multispectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	29
Tabla 7. Especificaciones de consumo del control remoto del dron Phantom 4 Multispectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	29
Tabla 8. Settings de la simulación. Fuente: elaboración propia	39
Tabla 9. Resultados respecto a la autonomía en el caso 1. Fuente: propia.....	44
Tabla 10. Resultados respecto a la autonomía en el caso 2. Fuente: propia.....	46
Tabla 11. Variables que intervienen en el análisis financiero de la inversión. Fuente: elaboración propia.	49
Tabla 12. Cálculo de las amortizaciones. Elaboración propia.....	54
Tabla 13. Cálculo del consumo eléctrico de los drones. Elaboración propia.....	54
Tabla 14. Cálculo del CAPEX. Elaboración propia	56
Tabla 15. Cálculo del OPEX. Elaboración propia.....	56
Tabla 16. Ejercicio económico de 2022 de los cultivos de España. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)	57
Tabla 17. Ejercicio económico de 2022 de los cultivos de Extremadura. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España).	59

Tabla 18. Fórmulas para los distintos indicadores económicos. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)	59
Tabla 19. Ejercicio económico de 2022 de los cultivos de la provincia de Almería. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España).	61
Tabla 20. Cuenta de resultados de la finca sin drones. Elaboración propia.	66
Tabla 21. Flujos de Caja de la inversión con un 15% de aumento de productividad y un 15% de disminución de costes directos. Elaboración Propia.....	67
Tabla 22. Aumento de producción del 15% sin ahorro de costes. Elaboración propia.	69
Tabla 23. Aumento de producción del 15,2% sin ahorro de costes. Elaboración propia	70
Tabla 24. Ahorro de costes del 15% sin aumento de producción. Elaboración propia.	71
Tabla 25. Ahorro de costes del 36,5% sin aumento de producción. Elaboración propia	72
Tabla 26. Gráfica comparativa de los beneficios generados por la plantación con y sin el uso de drones según los diferentes escenarios. Elaboración propia.....	73
Tabla 27. Cuenta de resultados con un margen del 10,8%, el mínimo para asegurar rentabilidad de la inversión. Elaboración propia.	75
Tabla 28. Cuenta de resultados de una finca de 11,65ha con un margen del 15%. Elaboración propia.	76

Índice de gráficos

Gráfico 1. Climograma de Badajoz. Fuente: (Climograma Nacional, s.f.)	31
Gráfico 2. Posición del Tomate con respecto a otros cultivos en cuanto a producto bruto. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)	57
Gráfico 3. Posición del Tomate con respecto a otros cultivos en cuanto a Coste de Producción. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)	58
Gráfico 4. Posición del Tomate con respecto a otros cultivos en cuanto a producto bruto. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)	58
Gráfico 5. Producto Bruto del Tomate en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia	62
Gráfico 6. Coste de producción del Tomate en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia	62
Gráfico 7. Margen neto de la producción de Tomates en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia	63
Gráfico 8. Beneficio del cultivo del Tomate en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia	63
Gráfico 9. Costes directos de la producción de Tomates en la CCAA de Extremadura en los últimos años. Elaboración propia.	65
Gráfico 10. Gráfica comparativa de los beneficios generados por la plantación con y sin el uso de drones. Elaboración propia	68
Gráfico 11. Sensibilidad de la rentabilidad de la inversión al porcentaje de aumento de producción y disminución de costes. Elaboración propia.	77
Gráfico 12. Sensibilidad de la rentabilidad de la inversión tras 4 años al tamaño de la plantación. Elaboración propia	78

Índice de imágenes

Imagen 1. Distintos Sensores en una máquina agrícola. Fuente: (Agricultura de Precisión)	15
Imagen 2. Dron multirrotor (DJI) frente a dron de ala fija (Parrot)	17
Imagen 3. Mapa profesional de restricciones para el vuelo de drones (ENAIRE Drones, 2024)	23
Imagen 4. Dron Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	26
Imagen 5. Dron P4 Multiespectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)	28
Imagen 6. Imagen de satélite de la parcela. Fuente: Google maps	30
Imagen 7. Ortofoto de la parcela con la superficie indicada. Fuente: (Sede Electrónica del Catastro. Gobierno de España)	31
Imagen 8. DTM de la parcela con curvas de nivel. Fuente: datos: (Greenfield Technologies), dron: DJI Phantom 4 multiespectral, elaboración: propia.	33
Imagen 9. Índice NDVI de la parcela en los meses mayo, junio y julio respectivamente. Fuente: datos: (Greenfield Technologies) dron: DJI Phantom 4 multiespectral, elaboración: propia.	34
Imagen 10. Tabla de colores para el índice NDVI. Fuente: propia	35
Imagen 11. Imagen RGB de la parcela en los meses mayo, junio y julio respectivamente. Fuente: datos: (Greenfield Technologies), dron: DJI Phantom 4 multiespectral, elaboración: propia.	35
Imagen 12. Índice térmico de la parcela en los meses de mayo y junio. Fuente: datos: (Greenfield Technologies), dron: Mavic 2 Enterprise Advanced, elaboración: propia.	36
Imagen 13. Leyenda de colores para el índice térmico de los meses de mayo y junio respectivamente. Fuente: propia	36
Imagen 14. Captura de pantalla de la selección de tipo de capa. Fuente: propia	37
Imagen 15. Captura de pantalla de la selección de imagen. Fuente: propia	37
Imagen 16. Captura de pantalla de la selección de propiedades de la capa. Fuente: propia.	38

Imagen 17. Captura de pantalla del dron elegido para la simulación y sus características. Fuente: propia.....	39
Imagen 18. Captura de pantalla del punto de vista de la simulación. Fuente: Propia.	40
Imagen 19. Captura de pantalla de la simulación vista desde los 120m de altura. Fuente: propia.....	41
Imagen 20. Captura de pantalla de la simulación vista desde los 500m de altura. Fuente: propia.....	41
Imagen 21. Warning de la activación de la función Return To Home. Fuente: Propia.....	43
Imagen 22. Control del dron bloqueado definitivamente por autonomía. Fuente: propia...	43
Imagen 23. Fin de la simulación 1 por autonomía. Fuente: propia	44
Imagen 24. Fin de la simulación 2 por autonomía. Fuente: propia	45
Imagen 25. DJI Smart Controller Enterprise Matrice 300 Series. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.).....	51
Imagen 26. Cultivo del Tomate en invernadero en Almería. Fuente: (Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.)	60

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

España es un país con gran tradición agraria, siendo en Europa el segundo país con mayor superficie de producción agrícola (Statista, 2023) y aunque en los últimos años la población ha ido emigrando cada vez más hacia la vida urbana, actualmente se está hablando de un “renacimiento agrícola”. Cada vez son más los agricultores en España que están tomando de la mano a la tecnología y están fusionando prácticas tradicionales con los nuevos avances tecnológicos, resultando un proceso más eficiente y sostenible.

Entre tales innovaciones mencionadas se encuentran la agricultura de precisión, fusión del Big Data y la agricultura que consiste en hacer un seguimiento de los cultivos, a través de tecnologías como el GPS, robots o drones que se ajusten a las necesidades específicas de cada plantación, evitando tratamientos generalistas que impliquen el derroche de insumos como agua, energía o fertilizantes (BBVA, 2023). A parte de evitar exceso de consumo de recursos, al ser más precisa, consigue mayor calidad de los cultivos ya que implica tomar la mejor decisión posible en cada momento. Es por tanto un modo de agricultura sostenible.

Los drones, como se acaba de mencionar son un instrumento que forma parte de la agricultura de precisión y ahora más que nunca ya se suma a la maquinaria tradicional en las explotaciones agrícolas. Se trata de una tecnología en pleno proceso de desarrollo, por lo que ofrece un campo amplio de posibilidades al cuestionarse la extensión de su uso.

En este proyecto se pretende analizar, como tecnología contribuyente a la sostenibilidad de la actividad agrícola, el uso de drones. Analizar la viabilidad económica de la inversión de su implantación para un agricultor promedio, teniendo en cuenta la situación actual del sector agrario en España.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el análisis de la contribución de los drones a la productividad de una plantación agrícola, analizando la inversión desde el foco económico. Con el fin de lograr este objetivo principal se han desarrollado las siguientes tareas:

Descripción de los drones y su tecnología

Se pretende estudiar drones concretos utilizados en el sector, los datos que son capaces de proporcionar, y la extensión de su uso. Resulta interesante entender las tecnologías integradas en ellos específicas para el uso en el campo. En este análisis se tendrá en cuenta la normativa bajo la cual se encuentran a la hora de sacar conclusiones sobre la extensión de las posibilidades de su uso.

Análisis de los datos obtenidos con estos drones

Se pretende analizar los datos obtenidos por estos drones, su calidad y qué conclusiones o predicciones se pueden obtener de ellos.

Comparativa de la eficiencia de una finca con o sin el uso de estos drones

Analizar el ahorro que supone para el agricultor el uso de estos drones. Hacer un análisis económico de la inversión que supone el uso de estos drones frente al ahorro en recursos que suponen (agua, luz, personal y tiempo) y en qué condiciones de beneficios y extensión de la plantación le resulta rentable esta inversión a un agricultor.

1.2 METODOLOGÍA

Para lograr cumplir los objetivos propuestos, se ha seguido el siguiente cronograma, repartiendo las diferentes tareas mediante un diagrama de Gantt (Tabla 3).

Tarea 0: Investigación inicial, concretar ideas y objetivos, redacción Anexo B

Tarea 1: Contactar con expertos en la materia:

A parte de una investigación propia se contactó con agricultores y personas afines al sector. En concreto la empresa Greenfield Technologies, basada en Badajoz y pionera en el uso de estos drones. Este contacto proporcionó los datos reales sobre los drones utilizados en tareas agrícolas, y proporcionó todos los datos de seguimiento del cultivo de tomate en una finca localizada en Talavera la Real, Badajoz. También este contacto fue útil para conocer mejor el sector y la realidad actual. También se contactó con propietarios de explotaciones agrícolas, que proporcionaron datos financieros reales relevantes en el estudio económico.

Tarea 2: Estudio de la normativa y limitaciones de los drones.

Debido a que la mayor limitación para uso de drones es la normativa que los rige, resulta interesante dedicar parte del proyecto a comprender la realidad del uso de estos drones, por lo que un breve estudio de las cláusulas más importantes para tener en cuenta para su uso es necesario.

Tarea 3: Análisis de los datos recogidos por los drones.

Se han analizado datos reales de una plantación mediante el software *QGIS*. A parte de analizar la extensión de la variedad de datos que pueden ser recogidos por los drones, se ha analizado la información que estos proporcionan y su utilidad para el agricultor, sacando conclusiones de lo que esto supone para la productividad de la finca.

Tarea 4: Simulaciones.

Se han realizado simulaciones del vuelo de los drones con el software de simulación de vuelo *DJI Flight Simulator* para determinar datos relevantes del uso de los drones como la operación de vuelo, el tiempo de uso, la velocidad, techo de vuelo, etc.

Tarea 5: Análisis económico.

Basándose en las conclusiones sacadas a partir del análisis de los datos obtenidos con los drones se hará un análisis económico de la inversión del uso de estos drones y del ahorro de recursos que supone (sabiendo que la hipótesis de la que parte el proyecto es que el uso de drones en la agricultura resulta en un proceso más eficiente y sostenible).

Tarea 6: Conclusiones

Tarea 7: Investigación y documentación

Debido a que gran parte del proyecto ha sido una investigación extensa del uso actual de los drones en el sector, la investigación y documentación ha sido esencial en todo el tiempo de desarrollo del proyecto. A parte de fuentes fiables de sitios oficiales de la web, ha sido especialmente relevante la información proporcionada por los expertos en la materia durante todo el proceso.

	Semanas																							
	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Tarea 0	█	█	█	█	█																			
tarea 1					█	█																		
tarea 2							█	█																
tarea 3									█	█	█													
tarea 4													█	█	█									
tarea 5																	█	█	█	█				
Tarea 6																					█			
Tarea 7	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Tabla 3. Diagrama de Gantt

Capítulo 2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO Y ESTADO DEL ARTE

La importancia de la sostenibilidad es palpable en cualquier sector de la industria, ya que la tendencia global apunta hacia un futuro sin recursos suficientes, y el medio ambiente gravemente dañado, y es la responsabilidad de las generaciones actuales velar por las condiciones de continuidad indefinida de la humanidad en la Tierra (Bilbao, Fuertes, & Guibert, 2006). En la nueva era de la sostenibilidad la misión de los ingenieros es la transformación de los sistemas que se han ido utilizando durante décadas, e inclinar la balanza hacia nuevas tecnologías que permitan el ahorro de recursos, que utilicen energías renovables, o que contribuyan a una economía circular.

En concreto uno de los problemas que se busca combatir con procesos sostenibles es la creciente escasez de recursos. El agua es uno de los recursos que presenta datos más alarmantes, como el que “la demanda de agua se cuadruplicó mientras que la población sólo se duplicó entre los años 1940 y 1990” (RWTH Aachen University, 2024).

La agricultura representa un 67% del consumo global de agua y un 30-40% de la producción global de alimentos depende del riego (RWTH Aachen University, 2024). Estos datos son los que hacen que buscar soluciones en la agricultura, para optimizar el uso de insumos, sea una forma directa de sostenibilidad.

Una forma de mezclar tecnología y agricultura es la “agricultura de precisión”. Las primeras nociones de agricultura de precisión se concibieron en EE.UU. en la década de los 80, utilizando la tecnología de la información para optimizar la dosis de insumos mediante la implantación de tecnología GPS en la maquinaria. El concepto llegó a España a finales de la década de los 90, y en los últimos años, las tecnologías utilizadas para el seguimiento de los cultivos y el monitoreo de los suelos (principales misiones de la agricultura de precisión) han ido creciendo en número y calidad (Flego & García, 2008).

Este concepto ofrece un amplio campo de mejora ya que partía de la Agricultura 3.0 de la década de los 90, la originalmente denominada “agricultura de precisión” y caracterizada por la utilización de sistemas GPS en la maquinaria, y ha evolucionado hacia la Agricultura 4.0 nacida en 2010, que se ha basado en la evolución y desarrollo de numerosas tecnologías como sensores en la maquinaria, drones o naves no tripuladas, el procesamiento de imágenes satelitales, sistemas de tecnología de información basados en la nube, análisis de Big Data... entre otras (Mergar, 2018). Actualmente los expertos hablan de la Agricultura 5.0 que estará basada en la robótica y la inteligencia artificial.

2.1 AGRICULTURA 4.0

Nota: la siguiente información relevante en este proyecto para contextualizar la Agricultura 4.0 ha sido basada en el Trabajo de fin de grado de Marta Sebastián Cantalejo de la Universidad Politécnica de Madrid. Para más información acerca de la Agricultura de Precisión véase fuente (Cantalejo, 2020).

Al igual que la Agricultura 3.0 es denominada “agricultura de precisión”, la Agricultura 4.0 va un paso más allá y es denominada “agricultura digital” ya que integra el uso de las nuevas tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). Se basa en el conocimiento, y busca una agricultura conectada mediante el desarrollo de software y hardware para crear una red de información extensa.

La agricultura 4.0 busca “hacer de la agricultura un pilar de la sustentabilidad en el mundo” y “llevar la agricultura al siguiente nivel al profundizar el uso de datos para hacer que las operaciones sean más rentables” (Latam, 2023). Dentro de este marco de la sostenibilidad, los principales problemas que busca afrontar la Agricultura 4.0 son:

- El cambio climático: abordar la creciente escasez de recursos, en especial la mala gestión de los recursos hídricos.

- El crecimiento demográfico: la demanda de producción es cada vez más alta por lo que métodos que busquen aumentar el rendimiento agrícola, sin la expansión terrenal, son necesarios.
- Erosión y pérdida de calidad de los suelos: por este motivo cada vez es más necesaria una gestión precisa y personalizada de los cultivos, y la caracterización de los suelos.

Las tecnologías que se asocian a la agricultura 4.0 son las siguientes (Mergar, 2018):

Sensores en la maquinaria/ redes de sensores en el suelo:

Los tres puntos básicos sobre los que se recoge información con sensores son el suelo la planta y el ambiente. Son varias las variables físicas que se pueden medir y posteriormente transformar en señal eléctrica para registrar la medida y analizarla.

Se combinan varios tipos de sensores para lograr recoger toda la información posible. Algunos tipos de sensores aplicables a la agricultura son:

- Los sensores eléctricos y electromagnéticos: permiten tomar medidas clave para la caracterización de los suelos como su humedad, textura, porosidad y temperatura.
- Los sensores ópticos: utilizados para medir propiedades de la planta como pueden ser la reflectancia o transmitancia numerosa. Estas medidas sirven para calcular índices que hablen de la salud de la planta como el NVDI que son indicadores utilizados para determinar la cantidad de fertilizante necesario, entre otras cosas.
- Los sensores electroquímicos: permiten determinar la calidad ambiental, ya que recogen información acerca de los compuestos químicos en el aire.

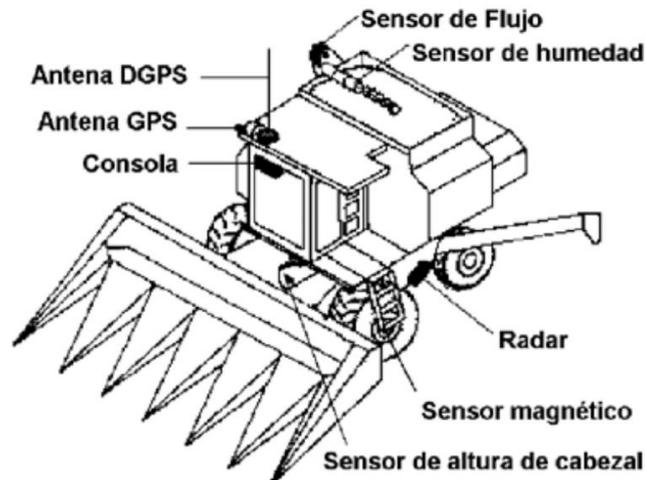


Imagen 1. Distintos Sensores en una máquina agrícola. Fuente: (Agricultura de Precisión, 2008)

Sistemas de Posicionamiento:

En la agricultura, el acceso a las coordenadas de un punto exacto en el terreno es importante para obtener muestras de este que posteriormente sean usadas para la toma de decisiones. Es por ello por lo que la maquinaria pesada utilizada actualmente en el campo como los tractores, se encuentre equipada con tecnología GPS.

Guiado automático de vehículos:

Un buen guiado del vehículo útil en el campo como pueden ser los tractores es esencial para la calidad de la información obtenida y el ahorro de tiempo y energía. Actualmente se pueden encontrar tractores automatizados, que poseen la gran ventaja competitiva de poder funcionar las 24 horas del día y bajo condiciones meteorológicas adversas.

Análisis de Big Data y Cloud Computing

La Agricultura 4.0 busca crear una red extensa en la que los datos obtenidos por las distintas empresas sean compartidos. El análisis de Big Data ayuda a gestionar los datos obtenidos de diversas fuentes.

Drones:

Se trata de una tecnología especialmente interesante por las numerosas ventajas que alberga su uso. Se hablará más extensamente de ellos en el siguiente apartado.

2.2 PAPEL DE LOS DRONES EN LA AGRICULTURA 4.0

Los drones son una tecnología de la Agricultura 4.0 que presentan varias ventajas frente a otras tecnologías (Barreiro & Valero, 2014) como:

- Alto nivel de precisión
- Versatilidad de movimientos
- Llegada a lugares de difícil acceso
- Estabilidad en el vuelo
- Rapidez de desplazamiento
- Reducción de costos frente a técnicas convencionales

Con todas estas ventajas su estudio resulta interesante porque son capaces de realizar las tareas previamente mencionadas en otras tecnologías, en poco tiempo y de manera precisa.

Al mismo tiempo, los drones presentan restricciones debido a la normativa existente, o incluso sus propias limitaciones tecnológicas como su limitada autonomía. Estas dos desventajas se explorarán más en profundidad en el proyecto.

Las posibilidades de los drones en la agricultura resultan de lo más interesantes. Mediante imágenes aéreas se obtiene información sobre el estado de salud del cultivo, siendo capaces de monitorizarlo durante toda la campaña. Al mismo tiempo con estos datos obtenidos se realizan, mediante modelos estadísticos, predicciones que son útiles a la hora de planificar maquinaria, logística y recursos necesarios, permitiendo así el ahorro de estos. Mediante imágenes topográficas, se logran optimizar los sistemas de riego, los diseños de nuevas

plantaciones o la ubicación de embalses. Estos servicios van más allá del agricultor, ya que se pueden aplicar a varias fincas de abastecimiento y por tanto dar información a la industria que facilitará la planificación de las fábricas, las producciones totales esperadas, etc. (Greenfield Technologies, 2024) .

En concreto algunas de las tareas que los drones facilitan en el campo mediante las mediciones que son capaces de efectuar son las siguientes:

- Supervisión global del terreno mediante imagen RGB, facilitando al agricultor tener una imagen amplia y precisa de la plantación sin involucrar personal.
- Medición de distintos índices vegetales mediante las cámaras multispectrales que permiten visualizar la densidad de vegetación o el estado de las plantas, entre otras funciones que ayudan a la toma de decisiones como la gestión de los fertilizantes.
- Medición del estrés hídrico mediante las cámaras termográficas que ayudan a la gestión del riego de los cultivos.

Existen distintos tipos de drones, en concreto dos son los más comunes en aplicaciones agrícolas: el multirrotor y el de ala fija (Murison, 2020). Los drones descritos en el Capítulo 3. de esta memoria pertenecen a la categoría de drones multirrotor. Aunque los de ala fija son más estables y presentan mayor autonomía, son más difíciles de manejar y significativamente más caros. Sin embargo, los multirrotor, son más pequeños y ágiles, haciéndolos más versátiles.



Imagen 2. Dron multirrotor (DJI) frente a dron de ala fija (Parrot)

Los drones aparte de recoger información se pueden usar para regar o rociar fertilizantes y pesticidas, debido a que también son capaces de volar a bajas alturas.

En definitiva, los drones, en el marco de la Agricultura 4.0 resultan muy relevantes, ya que integran varias tecnologías, y el abanico de posibilidades que ofrecen es muy amplio.

2.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Se han visto las ventajas que presenta la agricultura digital, y los drones como tecnología perteneciente a ellas. Sin embargo, aún existe una gran brecha entre aquellos agricultores que han adoptado esta tecnología en sus plantaciones y aquellos que siguen optando por métodos tradicionales.

Para los pequeños agricultores, dar pasos hacia una agricultura más sostenible invirtiendo en las nuevas tecnologías resulta fuera de su alcance. En concreto, la producción de los pequeños agricultores (aquellos que trabajan en fincas de menos de 2 ha) cubre alrededor del 80% de los alimentos que se consumen tanto en África subsahariana como en Asia, siendo alrededor del 70% de las personas que viven extrema pobreza en el mundo trabajadores en el sector agrario (Junta de Comercio y desarrollo de las Naciones Unidas, 2015). Es decir, el factor económico es muy importante a la hora de considerar esta tecnología de agricultura de precisión como un avance hacia la sostenibilidad global. De hecho, se trata de la principal barrera de la agricultura de precisión.

Las barreras de la agricultura de precisión son las siguientes (Flego & García, 2008):

- La agricultura de precisión está actualmente limitada a aquellos agricultores que tengan una gran escala de producción
- El precio de los equipos necesarios es percibido por los agricultores como alto, sin pararse a analizar sus ventajas o su viabilidad.
- Se requieren ciertas habilidades informáticas y sólo un 30% de los agricultores en el mundo tienen ordenador.
- Existe poca “cultura de innovación” en el sector.

- Incompatibilidad con la maquinaria existente

En este proyecto se pretende abordar estas limitaciones. En primer lugar, al hablar sólo de la inclusión de los drones en la agricultura, no existiría el problema de la incompatibilidad con la maquinaria. En segundo lugar, las barreras económicas son las que se pretenden analizar con este proyecto, en concreto, evaluando la contribución de los drones a la productividad de la finca, la viabilidad económica de la inversión en ellos y sacando conclusiones del mínimo de hectáreas en las que el proyecto sería viable, al mismo tiempo que del tipo de cultivos preferentes. El problema de la necesidad de las habilidades informáticas también se abordará en el proyecto, explicando brevemente la obtención de datos básicos sencillos, y cómo estos pueden proporcionar información suficiente para ayudar en la toma de decisiones.

2.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS ODS

Este proyecto se alinea perfectamente con los objetivos generales de desarrollo sostenible, en concreto con los objetivos 6, 9, 12 y 13 (Naciones Unidas, 2015).

ODS 6: Agua limpia y saneamiento:



Más del 40% de la población mundial se ve afectada por la escasez de agua. Este a su vez resulta un recurso fundamental en la agricultura.

Como se ha apuntado, uno de los motivos por los que nace la necesidad de la agricultura de precisión es la correcta gestión de los recursos hídricos. No es únicamente por cuestiones económicas, sino para abordar el problema de la escasez. El uso de drones para sacar información acerca del estrés hídrico de los cultivos o su temperatura permite al agricultor tomar decisiones óptimas en cuanto al riego de los cultivos, su frecuencia, cantidad o zonas de riego, optimizando al máximo este recurso.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura:



Los avances tecnológicos son fundamentales para hallar soluciones duraderas a los desafíos económicos y ambientales. En concreto los drones que se estudiarán en este proyecto son precisamente innovación que pretende solucionar el problema de la escasez y aumentar el rendimiento en un sector tradicional.

Todavía hay un amplio margen para la integración de las tecnologías existentes en numerosas plantaciones en todo el mundo que aún utilizan métodos tradicionales de producción. Es importante trabajar en ello para que exista espacio para la innovación, y la posterior integración de la denominada Agricultura 5.0, de la que expertos avisan, se podrá encontrar su uso práctico a partir de 2025, o en un futuro próximo.

ODS 12: Producción y consumo responsables



“La agricultura es el principal consumidor de agua en el mundo y el riego representa hoy casi el 70 % de toda el agua dulce disponible para el consumo humano” (Naciones Unidas, 2015). Este proyecto lucha directamente contra este problema, pretendiendo aportar una solución para la gestión eficiente de este recurso.

Además, es necesario encontrar modalidades de producción sostenibles, que sostengan los medios de subsistencia de generaciones actuales y futuras.

La agricultura de precisión afronta directamente este problema, ya que la toma de decisiones a partir de la información precisa obtenida permite aumentar significativamente el rendimiento, sin la necesidad de aumentar superficie de producción ni insumos necesarios.

ODS 13: Acción por el clima:



Los drones pueden contribuir a este ODS de muchas maneras:

Mediante el monitoreo del cambio climático, ayudan a una comprensión más profunda de los efectos del cambio climático a la agricultura.

La optimización de recursos contribuye directamente con este ODS; los drones pueden identificar rápidamente plagas y enfermedades en los cultivos, pudiendo evitar el uso excesivo de pesticidas, contribuyendo así a prácticas más sostenibles.

Con el mapeo de los suelos se puede hacer un seguimiento de la biodiversidad, ayudando a mantenerla; con su uso, se puede reducir a su vez el uso de maquinaria pesada, contribuyendo así a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero.

2.5 NORMATIVA DEL USO DE DRONES EN ESPAÑA

A la hora de cuestionar las posibilidades de estos drones, al mismo tiempo que analizar su productividad, es necesario conocer la normativa que se encuentra vigente. Los drones resultan un avance realmente útil, sin embargo, desde su implantación, se ha visto también como una amenaza hacia la privacidad de los individuos. También resultan un peligro ya que, al ser un objeto volador, en muchas ocasiones controlado remotamente, pueden generar accidentes. Es por eso por lo que su regulación es estricta. Según van surgiendo nuevas variedades y nuevos usos la normativa que los regula se va actualizando. Al tratarse de una tecnología tan nueva, las empresas como Green Field Technologies, deben estar siempre al día de nuevos cambios en normativa.

Un factor para tener en cuenta es que este proyecto se ha realizado sobre drones bajo la normativa vigente hasta el 1 de enero de 2024, cuando fue su última actualización. La nueva normativa entrará en vigor absoluto el 30 agosto de 2024.

Hasta ahora, en España, los drones utilizados en la agricultura se encuentran sujetos al Real decreto 1036/2017 (Ministerio de la presidencia y para las administraciones territoriales, 2017) regulación establecida por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto.

A continuación, se explican las cláusulas más relevantes de esta normativa y cómo pueden éstas resultar una limitación del potencial de los drones en el sector agrícola.

Registro de Drones:

- Todos los drones que pesen más de 250 gramos deben ser registrados en el Registro de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto de AESA.

Limitaciones de Altitud y Distancia:

- Los drones no pueden volar a más de 120 metros sobre el suelo o el agua.
- Deben mantenerse a una distancia mínima de 8 kilómetros de los aeropuertos o aeródromos y deben respetar la restricción de no volar dentro de las zonas de control de aeropuertos.

Esta cláusula resulta muy limitante hacia el uso de estos drones puesto que para tomar imágenes aéreas de gran extensión se debe recurrir a tecnologías más robustas como satélites.

A continuación, se adjunta un mapa de España con las áreas restringidas para el vuelo de drones (Imagen 3). Como se observa esta restricción limita bastante el uso de estos drones puesto que fincas situadas cerca de zonas restringidas (estas incluyen aeropuertos, aeródromos y derivados además de zonas protegidas), por ley no podrán hacer uso de esta tecnología.

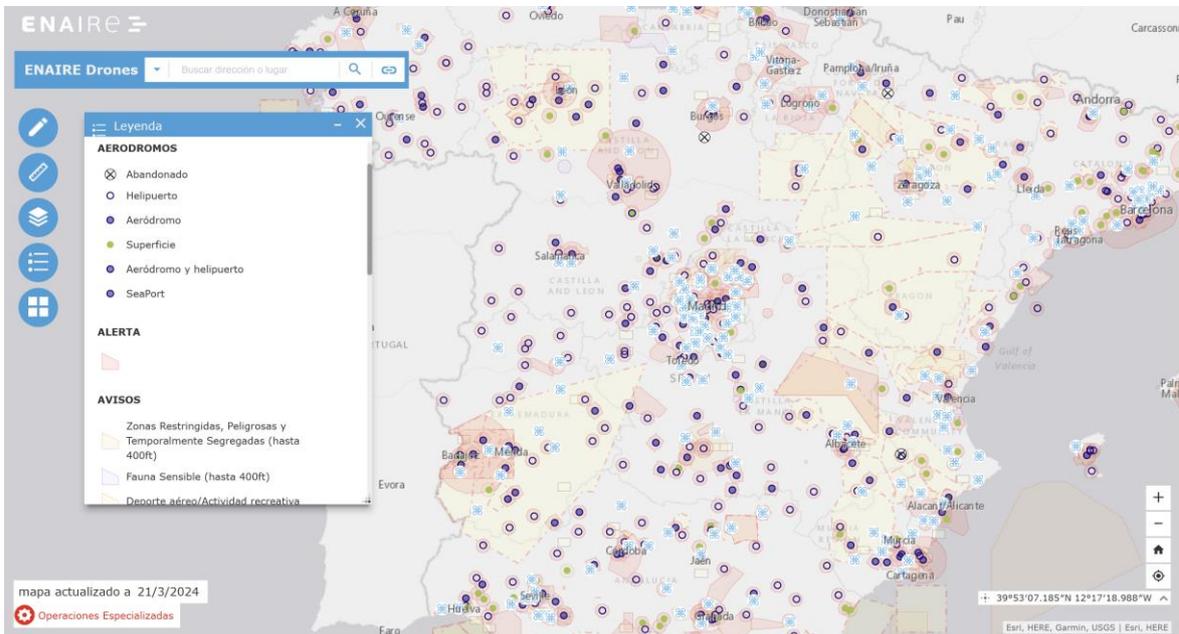


Imagen 3. Mapa profesional de restricciones para el vuelo de drones (ENAIRE Drones, 2024)

Distancia a Elementos y Personas:

- Los drones no pueden volar a menos de 150 metros de edificios, personas, vehículos, barcos u otras estructuras.
- Se prohíbe el vuelo sobre aglomeraciones de personas, a menos que se tenga un permiso especial de AESA.

Restricciones Específicas:

- Está prohibido el vuelo de drones sobre áreas urbanas, eventos públicos, y zonas de interés como estaciones de tren, parques naturales, y áreas de protección de la fauna y flora.
- Se prohíbe volar en condiciones meteorológicas adversas o en la oscuridad, a menos que el dron esté equipado con luces adecuadas y se cuente con permisos especiales.

Licencias y Certificaciones:

- Los operadores de drones que realicen actividades comerciales o profesionales deben obtener la certificación de piloto de drones, que se obtiene a través de una formación específica y la superación de un examen teórico y práctico.

Esta cláusula evita el uso irresponsable de los drones ya que únicamente personal cualificado podrá hacer uso de estos. Es por esto por lo que empresas que ofrezcan este servicio son tan necesarias. Si se trata de un particular que no desea hacer uso de servicios externos, debe tener en cuenta que la obtención de esta certificación supondrá un coste extra (véase Capítulo 5. de este documento)

Seguro de Responsabilidad Civil:

- Todos los drones deben estar cubiertos por un seguro de responsabilidad civil que cubra posibles daños causados a terceros durante el vuelo.

Normativa de Privacidad y Protección de Datos:

- Se deben respetar las leyes de privacidad y protección de datos al capturar imágenes o vídeos con drones, obteniendo el consentimiento de las personas o entidades antes de grabar o fotografiar en propiedades privadas o espacios públicos

2.6 CONCLUSIONES A CERCA DE LA NORMATIVA:

Debido a esta normativa: restricciones geográficas, de privacidad, altitud, licencias... etc, resulta muy limitado el uso que un productor particular (hablamos de un agricultor) le puede dar a estos drones. Empresas que se especialicen en este servicio, que dispongan de personal autorizado, de las licencias correspondientes y que conozcan las limitaciones geográficas son las que ahora mismo le pueden sacar el mayor provecho a estos drones. Aun así, resulta notable el número de restricciones que existen. Este es un factor a tener en cuenta a la hora de plantearse a quién le compensa hacer la inversión de estos drones, y se tendrá en cuenta el coste que supone el piloto especializado necesario.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS DRONES UTILIZADOS

En este capítulo se van a describir 2 tipos de drones utilizados por la empresa de Greenfield Technologies (y en general utilizados en la agricultura) para diferentes estudios agrícolas.

3.1 DJI MAVIC 2 ENTERPRISE ADVANCED

Cuenta con una cámara de alta resolución con zoom óptico de 32x y zoom digital de 16x, que permite tomar imágenes detalladas, lo que es particularmente útil en inspecciones de cultivos.

Además de la cámara visual, el dron está equipado con un sensor de imágenes térmicas radiométricas FLIR Boson. Este sensor permite la detección precisa de zonas cálidas y frías, esencial para identificar problemas en los cultivos, y ver con facilidad las zonas que precisan mayor cantidad de riego (Teledyne Flir, 2021).

Incluye modos de vuelo inteligentes que mantiene el encuadre mientras vuela libremente, para obtener imágenes precisas sobre las que se obtiene un orto mosaico que permite tener una imagen actual y de muy alta calidad del cultivo. Accesorios intercambiables, como el módulo RTK, que mejora la precisión de los datos obtenidos con el dron obteniendo imágenes más precisas en posición, especialmente útil para realizar mapas térmicos o realizar levantamientos topográficos.



Imagen 4. Dron Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

3.1.1 FICHA TÉCNICA DEL DRON:

Dimensiones	plegado	214 × 91 × 84 mm
	desplegado	322 × 242 × 84 mm
Peso	1.100 g (incluyendo batería y hélices)	
Tiempo de vuelo	Hasta 31 minutos	
Velocidad máxima de vuelo	72 km/h en modo deportivo	
Rango de control	Hasta 8 km (sin obstrucciones ni interferencias)	
Cámara visual	Sensor CMOS de 1/2 pulgada, 48 MP	
	Zoom óptico de 32x	
	Zoom digital de 16x	
Cámara térmica	Sensor radiométrico FLIR Boson	
	Resolución térmica de 640 × 512 píxeles	
Accesorios Opcionales	Altavoz de 100 dB	
	Faro LED de 2400 lúmenes	
	Baliza estroboscópica	
	Módulo RTK	
Temperatura de funcionamiento	De -10 a 40°C	

Tabla 4. Ficha técnica del Dron DJI Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

3.1.2 ESPECIFICACIONES DE CONSUMO:

Tipo de batería	LiPo
Capacidad	3850mAh
Tensión	15,4V
Energía	59,29Wh
Tiempo de carga	90 minutos

Tabla 5. Especificaciones de la batería de vuelo inteligente del dron Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

Tipo de batería	18650 Li-Po
Capacidad	5000mAh
Tensión	7,2V
Energía	48Wh
Tiempo de carga	2 horas

Tabla 6. Especificaciones de consumo del control remoto del dron Mavic 2 Enterprise Advanced. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

3.2 DJI PHANTOM 4 MULTIESPECTRAL

Este dron cuenta con una cámara multiespectral que captura imágenes en cinco bandas (azul, verde, rojo, borde rojo y cercano infrarrojo). Esto permite hacer análisis detallados de la salud de los cultivos, gestión de la fertilidad del suelo, la detección de enfermedades y otros estudios agrícolas.

Gracias a la estabilización avanzada y los sistemas de posicionamiento preciso (RTK), este dron ofrece una captura de datos precisa y fiable. Este dron se utiliza en aplicaciones de agricultura de precisión, que incluyen la monitorización de cultivo, detección de estrés

hídrico, gestión de fertilidad de suelo, detección temprana de enfermedades, y algunas otras. La capacidad de capturar múltiples bandas espectrales permite obtener información detallada sobre el estado de los cultivos y ayudar en la toma de decisiones.



Imagen 5. Dron P4 Multiespectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

3.2.1 FICHA TÉCNICA DEL DRON:

Dimensiones (hélices excluidas)	350 × 350 × 190 mm
Peso	1.487 g (incluyendo batería y hélices)
Tiempo de vuelo	Hasta 27 minutos
Velocidad máxima de vuelo	72 km/h en modo deportivo
Rango de control	Hasta 8 km (sin obstrucciones ni interferencias)
Cámara Multiespectral	Sensor CMOS de 1/2.7 pulgadas, 12 MP
	Captura de imágenes en cinco bandas espectrales: azul, verde, rojo, borde rojo y cercano infrarrojo. Cada sensor 2.08MP efectivos
Precisión del Posicionamiento	GPS + GLONASS
Resolución de las ortofotos	Hasta 2.74 cm/píxel
Temperatura de funcionamiento	De 0 a 40°C

Tabla 7. Ficha Técnica del dron Phantom 4 Multiespectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

3.2.2 ESPECIFICACIONES DE CONSUMO:

Tipo de batería	LiPo 4S
Capacidad	5870mAh
Tensión	15,2V
Energía	89,2Wh
Tiempo de carga	90 minutos

Tabla 8. especificaciones de la batería de vuelo inteligente del dron Phantom 4 Multispectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

Tipo de batería	LiPo 2S
Capacidad	6000mAh
Tensión	7,2V
Energía	48Wh
Tiempo de carga	2h

Tabla 9. Especificaciones de consumo del control remoto del dron Phantom 4 Multispectral. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

Capítulo 4. DATOS OBTENIDOS CON LOS DRONES

A continuación, se van a analizar los datos que obtiene con los drones mencionados una empresa como Greenfield Technologies al hacer el seguimiento del cultivo del tomate durante los meses de mayo, junio y julio de 2023. La fuente de obtención de todos los datos mencionados de la parcela es la empresa Greenfield Technologies. Las imágenes manipuladas son de elaboración propia.

4.1 CONTEXTO DE LA FINCA Y LA PLANTACIÓN

La finca se localiza en Aldea del Conde, Talavera la Real (Badajoz). Se trata de la parcela catastral 06128A01805007 (polígono 18, parcela 5007). La plantación de la cual se han obtenidos datos es de Tomate UG16112.

La dimensión de la parcela es de un total de 39,9286 Ha, pero en concreto la superficie de la plantación de tomates es de 16,3 Ha como bien se indica en la Imagen 7.

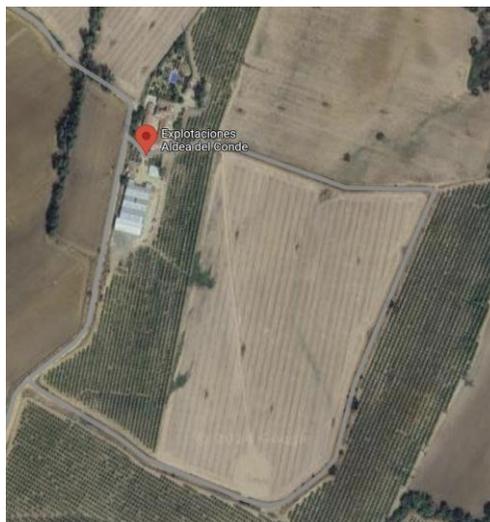


Imagen 6. Imagen de satélite de la parcela. Fuente: Google maps



Imagen 7. Ortofoto de la parcela con la superficie indicada. Fuente: (Sede Electrónica del Catastro. Gobierno de España)

La ubicación resulta ideal para la plantación de tomates ya que para el cultivo de este se necesitan unas temperaturas entre 20 y 30°C (véase Gráfico 3). También es importante conocer las necesidades de humedad para el cultivo del tomate para tener en cuenta las precipitaciones y las necesidades de riego según indiquen los datos tomados por el dron. El cultivo del tomate precisa una humedad relativa de entre 60 y 80%. (Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera., 2013).

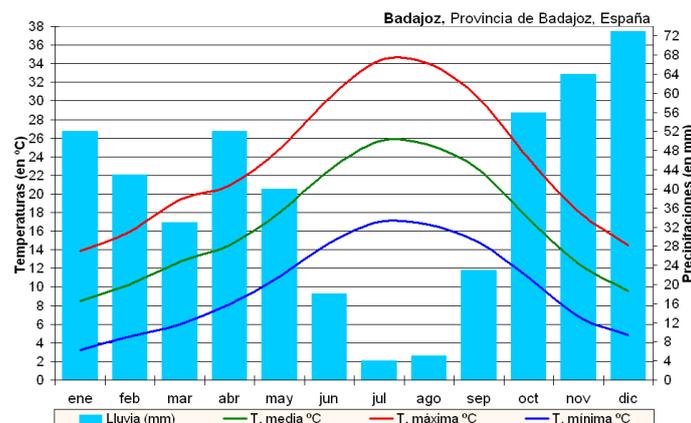


Gráfico 3. Climograma de Badajoz. Fuente: (Climograma Nacional, s.f.)

Los datos por analizar son del cultivo del tomate durante los meses de mayo, junio y julio de 2023.

4.2 DIVERSIDAD DE LOS DATOS

Con los datos obtenidos del dron se realizan mapas de prescripción de cultivos. Estos mapas se pueden clasificar en tres tipos: Mapas de rendimiento, de vigor de cultivo o de conductividad eléctrica (Cantalejo, 2020). En este caso, con los datos obtenidos se han realizado mapas de vigor de cultivo, que son obtenidos gracias a las cámaras multiespectrales.

Los diferentes datos, son recogidos con los drones en formato *.tif*. Para que realmente las imágenes sean de utilidad y poder analizar estos datos, se necesita un programa tipo GIS. En este proyecto se ha utilizado el software QGIS para observar la diferente información que proporcionan las imágenes. Este software permite hacer una amplia variedad de análisis y procesamientos para la agricultura de precisión como la delimitación de áreas de interés, la identificación de patrones y anomalías en los cultivos o la generación de mapas de índices vegetales. En este caso se ha utilizado el software para generar mapas de índices vegetales y para generar imágenes donde se permite observar la salud del cultivo.

Cabe mencionar que previo al análisis de las imágenes se procesan con softwares tipo PIX4Dmapping, para calibrarlas, corregir cualquier distorsión y posicionar y orientar cada imagen. Esta parte del proceso no se ha explicado en este proyecto ya que lo relevante para determinar la utilidad de los drones es analizar los datos obtenidos con ellos, no su conversión. La manipulación de imágenes se ha hecho sobre el mosaico, es decir, sobre las imágenes previamente superpuestas, calibradas y orientadas.

Los datos recogidos por los drones mencionados son:

Modelo digital del terreno

El DTM es una representación digital de la topografía del suelo y del terreno. En este caso al ser la parcela plana no se aprecia relieve en la imagen extraída. Aun así, combinando un

formato *Hillshade* con *pseudocolor monobanda* se pueden apreciar los puntos de mayor relieve del terreno (en colores rojos) y las de menor (en tonos azules). También en el software utilizado se puede elegir observar directamente las curvas de nivel. Al final se obtiene una imagen como la siguiente:



Imagen 8. DTM de la parcela con curvas de nivel. Fuente: datos: (Greenfield Technologies), dron: DJI Phantom 4 multispectral, elaboración: propia.

Índices multispectrales

NDVI: Índice de vegetación normalizado. Indica la intensidad de la radiación de la banda del infrarrojo en la que la vegetación emite o refleja según su estado de salud (Geo Innova, 2021). Es fundamentalmente un indicador de la salud del cultivo, además se puede utilizar como indicador de la sequía. El correcto monitoreo de este índice permitirá al agricultor aumentar su rendimiento ya que una rápida identificación de enfermedades, plagas o cultivo estresado permitirá su tratamiento y por tanto evitar posibles pérdidas, además de ahorrar dinero en fertilizantes. Este índice se calcula con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Ecuación 1. Cálculo del índice NDVI

Aunque en este caso esta fórmula no es necesaria ya que el dron *DJI Phantom 4 multispectral* recoge automáticamente este índice (ya calculado) y se muestra según las siguientes imágenes:

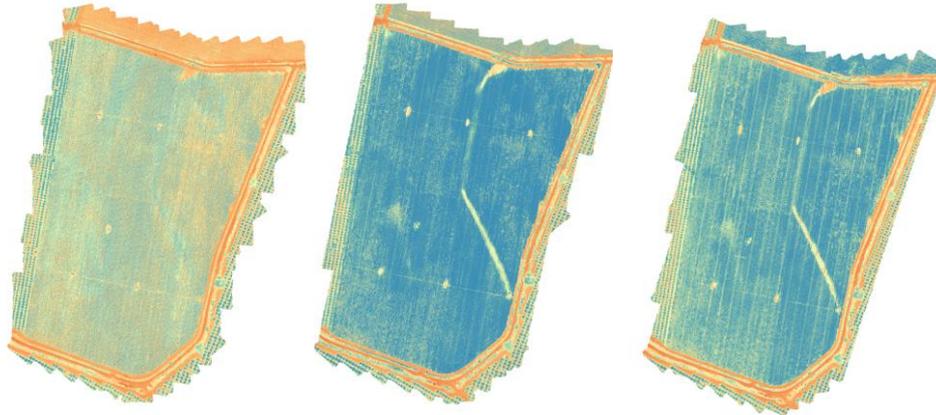


Imagen 9. Índice NDVI de la parcela en los meses mayo, junio y julio respectivamente. Fuente: datos: (Greenfield Technologies) dron: DJI Phantom 4 multispectral, elaboración: propia.

Los tonos más azulados indican un NDVI mayor mientras que los naranjas menor. El significado de que este índice sea menor o mayor es el siguiente:

Los valores negativos de este índice corresponden a entornos acuáticos (zonas encharcadas). Los valores positivos serán un indicativo de la densidad de la vegetación (cuanto mayor sea, mayor será el NDVI). Los valores del NDVI pertenecen al rango $[-1, 1]$. En este caso todos

los valores del NDVI son positivos ya que según los ajustes previamente seleccionados, en la Imagen 10 se puede observar a qué colores pertenece cada valor.

Valor	Color	Etiqueta
-0,2248651		-0,2249
0,065749		0,0657
0,3563631		0,3564
0,6469772		0,6470
0,9375913		0,9376

Imagen 10. Tabla de colores para el índice NDVI. Fuente: propia

NIR: Luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano.

RED: Luz reflejada en el rango rojo del espectro.

Imagen RGB

Las imágenes RBG utilizan el modelo de color “Red, Green and Blue” componiéndose de 3 canales de color, y obteniendo al final una reproducción más realista de las imágenes que otros modelos de color (Martinez Rodríguez , 2016). La imagen obtenida es la siguiente:



Imagen 11. Imagen RGB de la parcela en los meses mayo, junio y julio respectivamente. Fuente: datos: (Greenfield Technologies), dron: DJI Phantom 4 multispectral, elaboración: propia.

Índice térmico

Las imágenes térmicas, especialmente útiles para el control de riego de la finca, se recogen con el dron *Mavic 2 Enterprise Advanced*. La imagen obtenida se muestra de la siguiente manera:

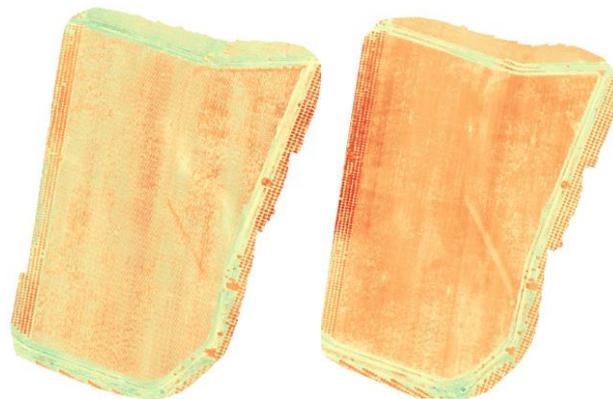


Imagen 12. Índice térmico de la parcela en los meses de mayo y junio. Fuente: datos: (Greenfield Technologies), dron: Mavic 2 Enterprise Advanced, elaboración: propia.

Para la Imagen 12 la leyenda de colores es la siguiente (medidas en °C):

Valor	Color	Etiqueta	Valor	Color	Etiqueta
14,4849682		14,4850	18,1082878		18,1083
24,5227799		24,5228	29,4991312		29,4991
34,5605917		34,5606	40,8899746		40,8900
44,5984035		44,5984	52,280818		52,2808
54,6362152		54,6362	63,6716614		63,6717

Imagen 13. Leyenda de colores para el índice térmico de los meses de mayo y junio respectivamente. Fuente: propia

Como se puede observar, las temperaturas se encuentran en el rango ideal de valores para el cultivo del tomate (entre 20 y 30°C).

4.2.1 METODOLOGÍA

La metodología seguida para sacar la información presentada en el apartado anterior es la siguiente:

1. Se importan los datos mediante GeoTIFF.
2. Se añaden las imágenes como capas ráster:

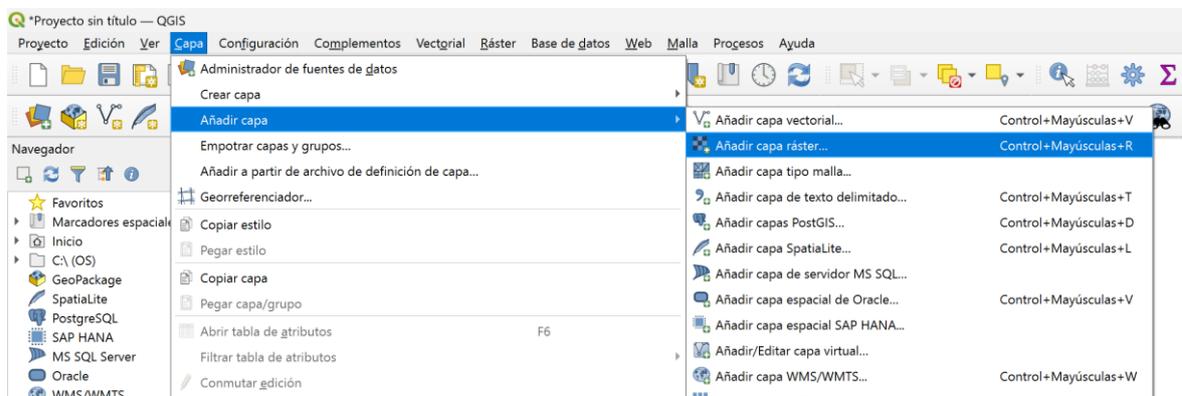


Imagen 14. Captura de pantalla de la selección de tipo de capa. Fuente: propia

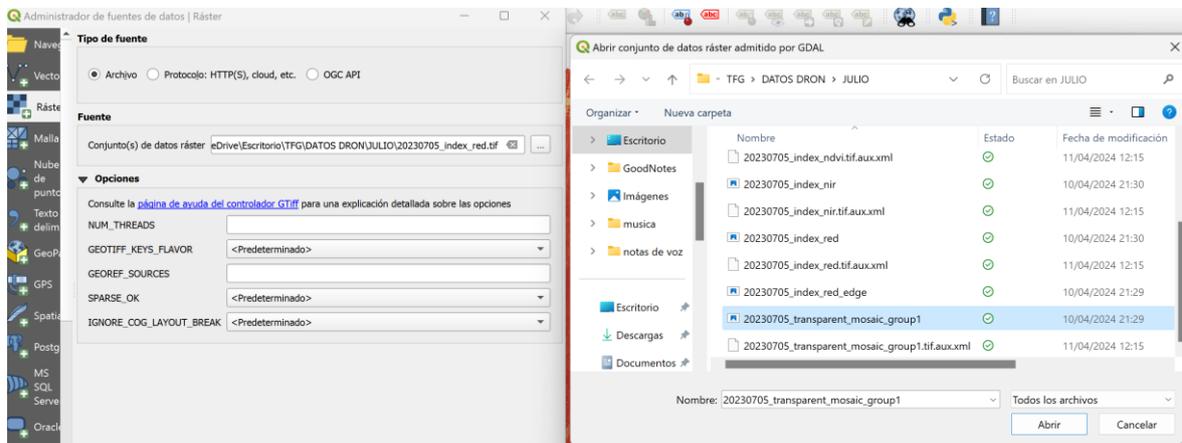


Imagen 15. Captura de pantalla de la selección de imagen. Fuente: propia

3. Se cambian las propiedades de cada capa según la banda espectral que nos interese observar. En este caso se ha seleccionado: “pseudocolor monobanda” y se ha seleccionado la rampa de color espectral (excepto para la imagen RGB que se ha seleccionado la opción “color de multibanda”). Realmente los colores son a

preferencia del usuario, lo fundamental es saber qué tonos corresponden a qué valores de cada índice.

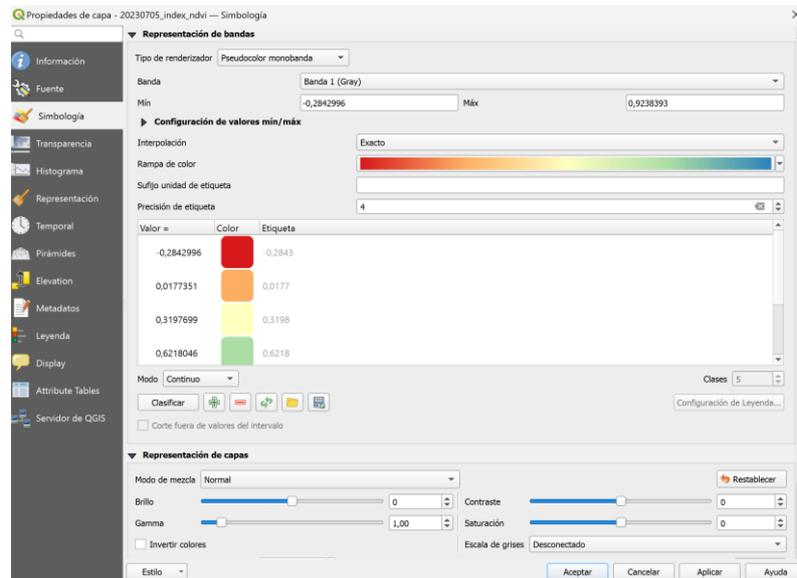


Imagen 16. Captura de pantalla de la selección de propiedades de la capa. Fuente: propia.

4.3 SIMULACIÓN DE UN VUELO FICTICIO

A continuación, se ha querido simular un vuelo ficticio. Para ello se ha utilizado el simulador *DJI Simulator* de la propia empresa que fabrica los drones, DJI. Este simulador es también utilizado por aquellos que pilotan los drones en esta industria ya que permite practicar el vuelo de la forma más realista posible y bajo diferentes escenarios sin asumir el riesgo real de perder el control del dron antes de saber pilotarlo. El simulador cuenta con cuatro módulos de uso: *Skills Training*, *Free Flight*, *Entertainment* y *Application Training*. Para este proyecto se ha utilizado la versión básica de este simulador que incluye únicamente los módulos *Free Flight* y *Entertainment*, aunque para el propósito de esta simulación se ha simulado con el módulo *Free Flight*.

4.3.1 SETTINGS DE LA SIMULACIÓN:

Módulo	Free Flight
escenario	Farm
Dron	Phantom 4 Pro
punto de vista	Drone FPV

Tabla 10. Settings de la simulación. Fuente: elaboración propia

Se ha elegido un escenario agrario, de acorde al uso práctico que se está analizando. Se ha simulado el dron *Phantom 4 Pro* que, aunque no es el modelo exacto de los anteriores drones mencionados, de los disponibles a simular con la versión básica es el más parecido (en este caso al dron *Phantom 4 multispectral*). Según las características descritas del dron su autonomía es de 27 minutos. El “Hovering Time” máximo es de 30s, este dato es relevante ya que se refiere a la cantidad de tiempo que puede estar el dron sin moverse en el aire, y para la captura de datos es favorable que el dron esté quieto el máximo tiempo posible (Gross, 2023).



Imagen 17. Captura de pantalla del dron elegido para la simulación y sus características. Fuente: propia

El punto de vista elegido es el de “Drone FPV”. De este modo se puede ver directamente lo que se observa en la pantalla disponible para el piloto, desde la perspectiva del dron.



Imagen 18. Captura de pantalla del punto de vista de la simulación. Fuente: Propia.

4.3.2 INFORMACIÓN OBTENIDA CON LA SIMULACIÓN

En esta simulación se ha obtenido la siguiente información:

Techo de vuelo:

El propio simulador tiene un tope de altura incorporado de 500m, lo cual es significativamente mayor al tope de altura legal (120m).

Para alcanzar los 120m de altura se han tardado 24s. La vista desde esta altura es la que se muestra en la Imagen 19. Esto es el tope al que se ven sometidos en la vida real los agricultores. Si estos quisieran obtener imágenes desde más alturas deben recurrir a satélites.

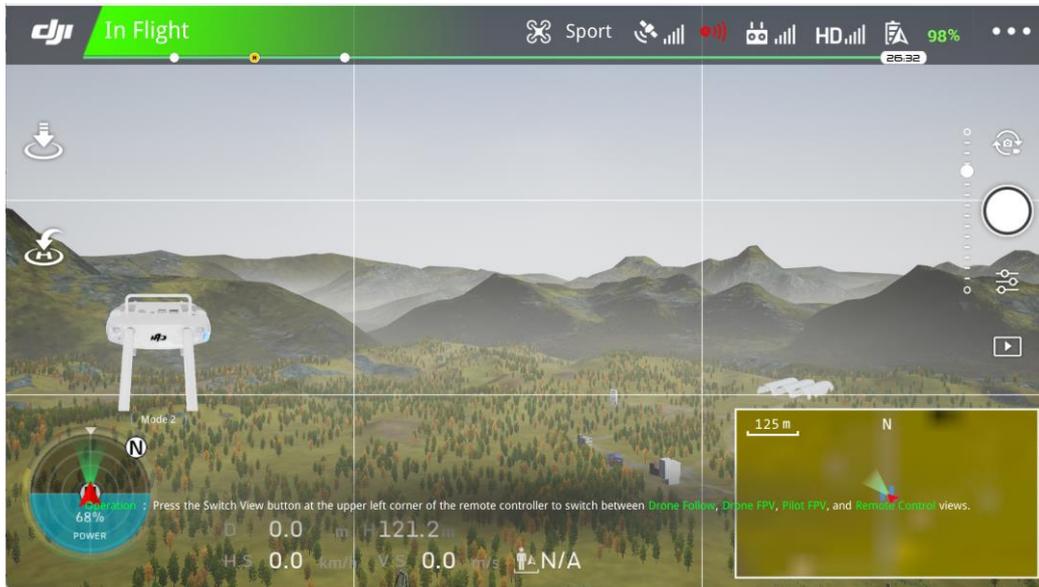


Imagen 19. Captura de pantalla de la simulación vista desde los 120m de altura. Fuente: propia

Para alcanzar el techo de vuelo de 500m el tiempo empleado ha sido de 75s. La imagen obtenida a esta altura es la que se muestra en la Imagen 20 que no sería factible de obtener en la realidad debido a las restricciones legales existentes mencionadas en el apartado 2.5 de este documento.

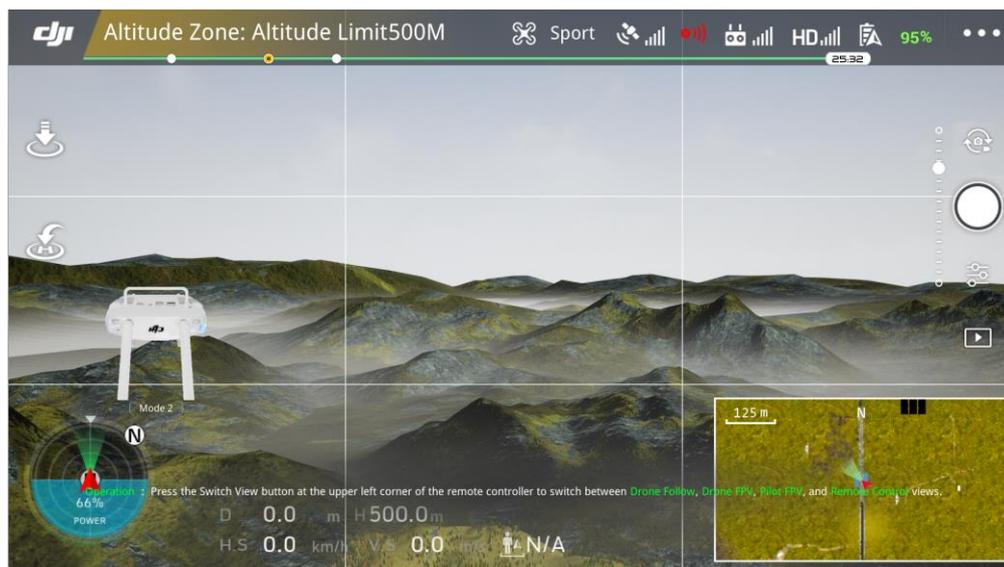


Imagen 20. Captura de pantalla de la simulación vista desde los 500m de altura. Fuente: propia

Velocidad máxima

Velocidad máxima de ascenso: 6m/s

Velocidad máxima de descenso: 4m/s

Velocidad máxima horizontal: 72 km/h

Velocidad máxima de descenso en la función *Return to home*: 3m/s

Autonomía

El simulador incluye información de la autonomía de cada dron que se refleja en un temporizador incluido en la simulación. El aviso de “batería baja” se realiza en cualquier caso con un 30% restante. Cuando el dron se encuentra en un punto de batería crítico, se activa la función *Return to home* (Imagen 21) donde el control del dron queda desactivado y este vuelve automáticamente al punto de partida. Para testar esta función se han hecho 2 simulaciones donde se ha desplazado el dron hacia 2 puntos diferentes para ver si esta función se activa de acuerdo con cuánto de lejos esté el dron del punto de partida. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- 1) En esta primera simulación se subió hasta el punto indicado en la Tabla 11. Con un 20% de batería se activó automáticamente la función *Return to home* y se llegó al punto de partida. Sin embargo, al llegar a este punto, se ha comprobado que la función *Return to home* se desactivó y se retomó el control del dron, permitiendo elevarse 225m hasta que la función *Cannot Take Off* (el despegue queda bloqueado y el control desactivado) se activa como se muestra en la Imagen 22. Finalmente, el dron vuelve al punto de partida y cuando llega, el despegue queda bloqueado definitivamente y se termina la simulación, quedando aún 1 minuto y 9 segundos de autonomía “teóricamente”. Este punto final se muestra en la Imagen 23.



Imagen 21. Warning de la activación de la función Return To Home. Fuente: Propia

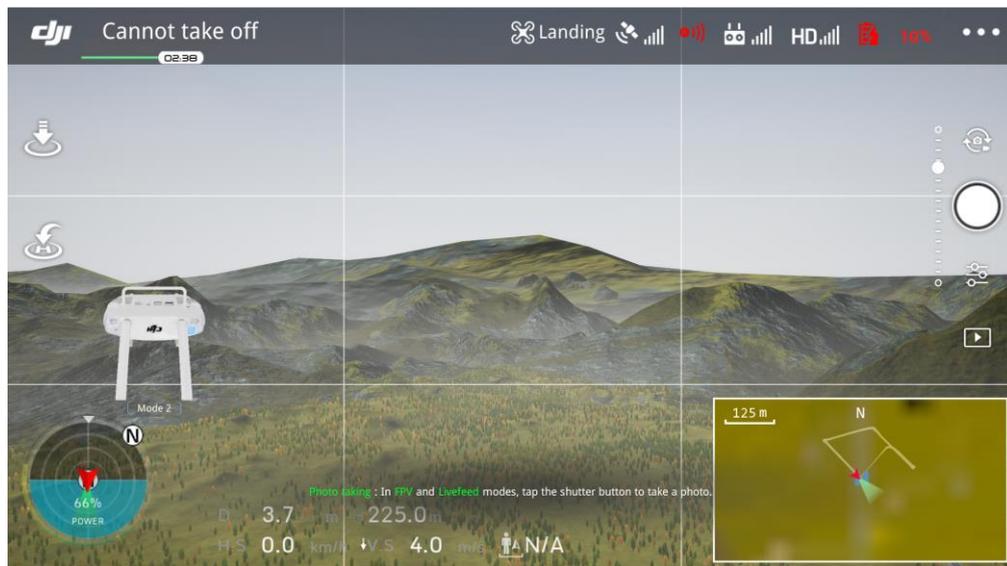


Imagen 22. Control del dron bloqueado definitivamente por autonomía. Fuente: propia



Imagen 23. Fin de la simulación 1 por autonomía. Fuente: propia

Los datos de la simulación quedan recogidos en la siguiente tabla:

Punto de partida	D: 127,1m H=240.6m
Nivel de batería en el que se activa <i>Return to home</i>	20%
Tiempo transcurrido de la simulación tras el que se activa la función <i>Return to home</i>:	22 minutos
Nivel de batería al llegar al punto de retorno:	14%
Tiempo de llegada al punto de retorno	90 segundos
Nivel de batería en el que el despegue está bloqueado	10%

Tabla 11. Resultados respecto a la autonomía en el caso 1. Fuente: propia

- 2) En este segundo intento, donde se ha llevado en un inicio el dron a un punto más alejado, al llegar al punto de partida el nivel de batería era demasiado bajo y ya no era posible despegar de nuevo. Esta vez la simulación ha acabado antes con 2 minutos y 27 segundos restantes y 9% de autonomía. Esto comprueba la hipótesis inicial en la que se planteaba que la autonomía sería diferente dependiendo de cuánto se aleje el dron del punto de partida.

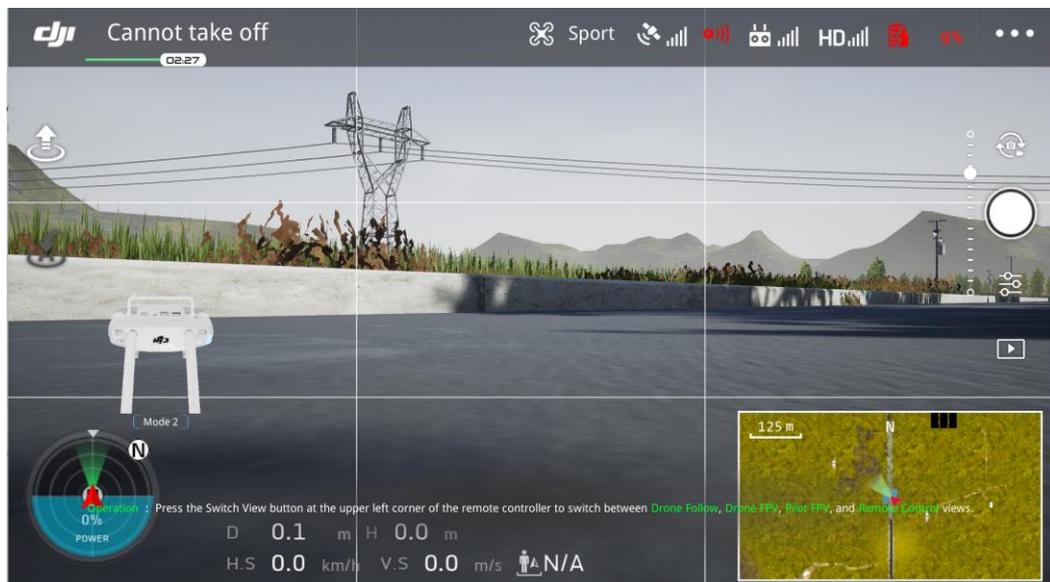


Imagen 24. Fin de la simulación 2 por autonomía. Fuente: propia

Los resultados de esta segunda simulación quedan recogidos en la siguiente tabla:

Punto de partida	D=0m H=500m
Nivel de batería en el que se activa <i>Return to home</i>	21%
Tiempo transcurrido de la simulación tras el que se activa la función <i>Return to home</i>:	21 minutos
Nivel de batería al llegar al punto de retorno:	10%
Tiempo de llegada al punto de retorno	2 minutos, 45 s
Nivel de batería en el que el despegue está bloqueado	9%

Tabla 12. Resultados respecto a la autonomía en el caso 2. Fuente: propia

Con estas dos simulaciones se ha podido comprobar que, aunque la autonomía teórica sea de 27 minutos, el control del dron se pierde mucho antes, aproximadamente 5 minutos antes, incluso más si el punto en el que se encuentra el dron está muy alejado. El piloto del dron deberá tener esto en cuenta a la hora de utilizarlo.

Comportamiento ante obstáculos

Se ha querido comprobar el comportamiento del dron ante un obstáculo como un edificio. El resultado de la simulación es que al chocarse con objetos el dron cae al suelo y la simulación vuelve a empezar desde el punto de partida. Es decir, el dron no cuenta con ningún sistema de prevención de choques, y es por esto por lo que el piloto debe estar especializado por razones de seguridad.

4.3.3 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN:

Con estas simulaciones se ha podido obtener información relevante con respecto a la autonomía de los drones y la dinámica de vuelo de estos. El uso de estos simuladores resulta fundamental para los pilotos de los drones ya que los escenarios disponibles y todas las

funciones de entreno son ideales para hacerse con una noción sobre el pilotaje de los drones. Lo ideal es utilizar el simulador con el propio mando de control incluido con el dron.

Las imágenes obtenidas en esta simulación son además un fiel reflejo de lo que puede observar el piloto del dron en el momento del vuelo, ya que las aplicaciones de vuelo que ofrece la empresa fabricante de los drones DJI, muestran un display igual al de las capturas de pantalla.

También, vistos los inconvenientes que presentan los drones en cuanto a autonomía o riesgo de choques, pueden ser evitado si se plantea la opción de recurrir a aplicaciones de planificación de vuelo como sería DJI Pilot. En esta aplicación hay 2 opciones de vuelo: en primer lugar, *Manual Flight*, que es la opción explorada en la anterior simulación; y por otro lado *Mission Flight*, donde se puede planear la ruta del dron sobre la imagen satélite que incluye la aplicación.

4.4 USO PRÁCTICO DE LOS DATOS

Los datos obtenidos con los drones mostrados previamente proporcionan una gran información al agricultor sobre el estado de la finca y esto le ayuda a la hora de la toma de decisiones. Algunas de las decisiones que ayuda a tomar que influyen directamente en la rentabilidad de la plantación son:

Monitoreo de los cultivos

El uso de los drones permite un monitoreo frecuente y detallado, a través de las imágenes de alta resolución o aquellas que muestran las diferentes bandas espectrales y térmicas, se logra identificar con antelación problemas como plagas, estrés hídrico, enfermedades... en vez de que su supervisión dependa de inspecciones visuales que muchas veces no logran captar a tiempo estos problemas que pueden resultar, en ocasiones, en pérdidas graves para el agricultor.

Riego y gestión del agua

A través de los drones se puede llevar un seguimiento de la humedad del suelo de la finca, lo que permite al agricultor optar por un sistema de riego de precisión que resulta en un uso más eficiente del agua y una distribución de los recursos más acorde con las necesidades del cultivo. Esto, a la larga resulta no sólo en un ahorro de insumos y por tanto de coste de producción, sino también en una mayor calidad del cultivo y, globalmente en un aumento del rendimiento de la finca.

Gestión de plagas y enfermedades

Como se ha mencionado anteriormente, con los drones se puede hacer una detección temprana de las plagas y enfermedades, evitando así pérdidas de rendimiento y el uso de aplicaciones preventivas (que resultan un coste adicional). Esto se hace mediante las cámaras multiespectrales. Con estas imágenes se pueden detectar signos tempranos de plagas o enfermedades a través de cambios en la reflectancia, por ejemplo.

Realmente con toda esta información se puede concluir que el uso de drones puede conducir al aumento del rendimiento de la finca y la reducción de costes de producción. Aunque esta es precisamente la hipótesis de este proyecto, que no resulta de gran valor sin el análisis económico del siguiente capítulo donde se analiza el coste de la inversión de estos drones.

Capítulo 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

A continuación, el capítulo más importante del proyecto, ya que se pretende, a través del ejemplo ya introducido de la finca en Talavera la Real, analizar si realmente la inversión de estos drones es viable económicamente.

Este análisis financiero de la inversión se ha hecho bajo el marco de la sostenibilidad y dentro del contexto de la economía circular (Dopacio, 2024).

En primer lugar, se va a efectuar el cálculo de la inversión de implementar la tecnología de los drones. Este cálculo servirá para cualquier finca en general. Posteriormente se procederá a estudiar su viabilidad económica en el ejemplo concreto de la plantación de tomates de Talavera la Real, Badajoz.

5.1 DECISIONES DE INVERSIÓN:

A la hora de considerar la inversión, estas son las variables fundamentales que intervienen en la toma de decisiones.

Inversor	Agricultor
Activo en el que se invierte	Drones
Coste de oportunidad	No conocer en detalle el estado de plantación, utilizar métodos más tradicionales.
Esperanza de obtener una recompensa en el futuro	Ahorro de recursos, aumento de producción, mejora del rendimiento de la finca y mantenimiento del valor patrimonial.

Tabla 13. variables que intervienen en el análisis financiero de la inversión. Fuente: elaboración propia.

Aunque podría resultar interesante analizar la inversión también de un sistema de riego de precisión, debida a la complejidad de sustituir el sistema de riego tradicional por uno de precisión, su análisis queda fuera de los objetivos de este proyecto.

5.2 INVERSIÓN: CÁLCULO DEL CAPEX

Estos son los distintos costes que se han tenido en cuenta:

Drones

Se han tenido en cuenta 2 drones cuya descripción técnica se ha realizado en el Capítulo 3. de este documento: el dron *Mavic 2 Enterprise Advanced* y el dron *Phantom 4 Multispectral*. Para determinar el coste de estos se ha recurrido a la empresa colaboradora en este proyecto, Greenfield Technologies debido a que estos drones no están disponibles al público por su uso industrial.

- *Phantom 4 Multispectral*: 5.041,00 € + 21%I.V.A. = 6.099,61€
- *Mavic 2 Enterprise Advanced*: 4.983,00 € + 21%I.V.A. = 6.029,43€

Accesorios

Se ha considerado también el coste del módulo RTK (406,06 € + 21%I.V.A.= 514€), necesario para obtener imágenes precisas en posición, y que ha permitido obtener las imágenes expuestas en el Capítulo 4. de este documento.

Software necesario

Existen muchos softwares para el análisis de datos de los drones. Para el propósito de este estudio económico, queriendo evaluar una opción válida y de menor coste se han considerado los siguientes softwares, mencionados previamente en este documento.

- PIX4D mapper: software líder en el procesamiento de imágenes aéreas para la generación de mapas. Realiza la calibración de imágenes para corregir distorsiones. Además, identifica puntos comunes entre imágenes superpuestas para posicionar y orientar cada imagen. Este software es de pago y existen varios planes a explorar:

- Plan mensual: $290\text{€} + 21\% \text{I.V.A.} = 350,9\text{€/mes}$
- Plan anual: $2900\text{€} + 21\% \text{I.V.A.} = 3.509\text{€/año}$
- Plan puntual: pago único de $4690\text{€} + 21\% \text{I.V.A.} = 5.674,9\text{€}$
- Plan anual + formación: $3170\text{€} + 21\% \text{I.V.A.}$ (incluye la licencia de 1 año) = $3.835,7\text{€}$

Para el propósito de este proyecto se ha considerado el plan puntual, para que se trate de un único pago en la inversión inicial. Para que esta opción sea más rentable que el plan anual, su uso debe ser de un mínimo de 2 años. El plan anual + formación no se contempla ya que la formación del operador está considerada aparte.

- QGIs: software gratuito que permite realizar el procesamiento y análisis de los datos obtenidos con el dron.
- DJI Pilot: aplicación gratuita para diseñar el vuelo de los drones o pilotarlos manualmente. Esta aplicación viene previamente instalada en el *DJI Smart Controller*.

Equipos informáticos necesarios

Para pilotar el dron hace falta un display. Si no viene incluido con el dron, cualquier Tablet del mercado sirve, sin embargo, en el precio de los drones se ha incluido la versión que viene con el *DJI Smart Controller*, por lo que no se ha incluido ningún coste extra del display.



Imagen 25. DJI Smart Controller Enterprise Matrice 300 Series. Fuente: (DJI Enterprise , s.f.)

Un ordenador será necesario para el procesamiento de datos. Las especificaciones recomendadas para utilizar el software PIX4Dmapper son las siguientes (Fuente: (Pix4D, 2024)):

- Windows 8, 10 64 bits.
- CPU quad-core o hexa-core Intel i7/Intel i9/Threadripper/Xeon/.
- GeForce GTX GPU compatible con OpenGL 3.2 y 2 GB de RAM.
- Disco duro: SSD.
- Proyectos pequeños (menos de 100 imágenes de 14 MP): 8 GB de RAM, espacio libre de 15 GB en SDD
- Proyectos de tamaño mediano (entre 100 y 500 imágenes de 14 MP): 16 GB de RAM, espacio libre de 30 GB en SDD
- Proyectos grandes (más de 500 imágenes de 14 MP): 32 GB de RAM, espacio libre de 60 GB en SDD
- Proyectos muy grandes (más de 2000 imágenes de 14 MP): 64 GB de RAM, espacio libre de 120 GB en SSD.

Con estas especificaciones el ordenador elegido es el portátil HP 250 G9 Intel Core i7-1255U/32GB/1TB SSD/ 15.6''. Su precio es de 710,21€ + 21%I.V.A= 899€. (HP, s.f.)

Ingeniería

Se ha tenido en cuenta el tiempo empleado en la auditoria de este proyecto, por parte del ingeniero junior (45€ la hora) y del sénior (90€ la hora). Se han estimado un total de 100 horas del ingeniero junior y 20 del sénior. Esto suma un total de 4500€ del ingeniero junior y 1800€ del sénior. Se ha considerado un 21% de I.V.A.

Otros

Se han asumido 200€ de coste de infraestructura (almacenaje del dron, plataforma de vuelo, etc.).

Debido a los requisitos legales que se pueden consultar en el 2.5 de este documento, es necesario la obtención de un certificado de piloto de dron.

Para los drones descritos en este documento será necesario el certificado A2 de drones (según la normativa vigente ya que pesan más de 500g). Para la obtención de este título se requiere un examen teórico, el cual se realiza online, y una formación práctica que puede ser efectuada de forma independiente desde la plataforma de AESA o bien optar por cursos específicos (AESA, 2024). El procedimiento de matriculación, formación y examen es gratuito. Aunque se puede hacer de forma independiente, se ha escogido un curso ofrecido por la empresa UMILES, una empresa líder en prestación de servicios con drones, entre los que se incluye formación para el pilotaje de estos. El precio del curso es de 233,05+21%I.V.A = 295€ (UMILES, 2024). Por último, es importante tener en cuenta que el certificado tiene una validez de 5 años.

En este caso no es necesaria la obtención de licencias para los drones ya que ya normativa de AESA indica que solo será necesario para operaciones en la categoría certificada.

5.2.1 AMORTIZACIÓN

Es importante considerar la amortización de los drones, los accesorios (el módulo RTK) y del equipo informático (portátil). La amortización se ha calculado como:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{valor de adquisición} - \text{valor residual}}{\text{años de vida útil}}$$

Ecuación 2. Cálculo de la amortización

Las hipótesis para efectuar el cálculo de la amortización son las siguientes:

- Vida útil: Según fuentes del sector, la vida útil de los drones se puede estimar en torno a 4 años. Se ha asumido también este periodo para calcular la amortización del equipo informático.
- Valor residual: se ha estimado un valor residual del 10% del precio de adquisición.

El cálculo resultante de las amortizaciones es el que se muestra en la siguiente tabla:

<u>Concepto</u>	<u>€/año</u>
Drones	2255,4€
Accesorios	91,3635€
equipos informáticos	159,79725€

Tabla 14. Cálculo de las amortizaciones. Elaboración propia.

5.3 COSTES DE OPERACIÓN: CÁLCULO DEL OPEX

En los costes de operación de los drones se han tenido en cuenta los siguientes:

Coste eléctrico:

Para el cálculo del consumo se han efectuado las siguientes hipótesis:

- Las baterías de los drones y del control remoto se cargan cada vez que se realiza un vuelo.
- Se estiman 5 vuelos a la semana.
- Se ha utilizado los valores de consumo de las baterías no del dron.
- Como precio del kWh se ha escogido una tarifa fija de la empresa Endesa de 0,115200€/kWh. (endesa, 2024).

El resultado se encuentra en la siguiente tabla y resulta prácticamente despreciable.

CONSUMO ELÉCTRICO	
coste (€/Wh)	0,000115 €/Wh
consumo (Wh) por cada vuelo	244,49 Wh
numero vuelos al año	240 vuelos/año
consumo total (Wh/año)	58.677,60 Wh/año
coste total (€/año)	6,76 €

Tabla 15. Cálculo del consumo eléctrico de los drones. Elaboración propia

Coste de mantenimiento:

Se contrata el programa de mantenimiento de DJI Care con el plan de cobertura de 2 años. El coste es de $474\text{€} + 21\% \text{I.V.A.} = 600\text{€}/2\text{años}$. Esto es un dato aproximado ya que el plan depende del distribuidor y del modelo de dron. En el cálculo del OPEX se considerará doble, un plan por cada dron.

Coste operador:

Para calcular el coste de personal del operador del dron se han efectuado las siguientes hipótesis:

- Se trata de parte del personal cualificado y fijo de la finca, como podría ser el encargado.
- Se estima que el salario de este individuo es de 33.000€ al año. Este coste se ha obtenido de datos financieros reales de una plantación de olivares en Extremadura de 320 ha localizada a 3-4km de distancia de la finca analizada (Fuente: contacto del sector).
- Se estima que el 20% del tiempo de trabajo al año lo dedica al manejo y análisis del dron y los datos obtenidos.

5.4 COSTE TOTAL

En el coste total de la inversión se tienen en cuenta el CAPEX y el OPEX (en las tablas siguientes) con el 21% de I.V.A.

CAPEX	bruto	I.V.A (21%)
Drones	10.024,00 €	2.105,04 €
Accesorios	406,06 €	85,27 €
Softwares	4.690,00 €	984,90 €
Equipos informáticos	710,21 €	149,14 €
Ingeniería	6.300,00 €	1.323,00 €
Otros	433,05 €	90,94 €
Total	22.563,32 €	4.738,30 €
Total con impuestos		27.301,62 €

Tabla 16. Cálculo del CAPEX. Elaboración propia

OPEX	bruto	I.V.A (21%)
Consumo eléctrico	5,34 €	1,12 €
Coste mantenimiento	474,00 €	99,54 €
Coste operador	5.214,00 €	1.094,94 €
Total	5.693,34 €	1.195,60 €
Total con impuestos		6.888,94 €

Tabla 17. Cálculo del OPEX. Elaboración propia.

5.5 CONTEXTO DEL EJEMPLO

A continuación, se va a analizar la viabilidad económica de la inversión en un ejemplo concreto.

En este ejemplo se ha considerado la inversión de los drones en una plantación en extensivo de tomates. A continuación, se presenta un breve contexto económico del tomate que servirá para hacer una comparativa con el resto de los cultivos en España, y para la posterior determinación de los costes y los flujos de caja.

En la siguiente tabla (Tabla 18) se puede observar tras el ejercicio de 2022 (el más reciente publicado), dónde se sitúa el Tomate con respecto a otros cultivos de España en cuanto a diferentes indicadores económicos:

Agrup. cultivo	Producto bruto (€/ha)	Coste producción (€/ha)	Margen neto (€/ha)	Beneficio (€/ha)
⊕ Otros Productos Vegetales	575,30 ▲	338,11 ▬	347,74 ▲	237 ▲
⊕ Proteaginosas	686,31 ▬	661,81 ▬	171,84 ▬	25 ▲
⊕ Oleaginosas	886,90 ▬	894,15 ▬	165,96 ▬	-7 ▲
⊕ Cereales	996,90 ▬	950,20 ▬	228,02 ▬	47 ▲
⊕ Cult. Forrajeros	1.591,49 ▲	872,33 ▬	825,18 ▲	719 ▲
⊕ Olivar	1.995,80 ▬	1.889,15 ▬	639,14 ▬	107 ▼
⊕ Viñedo	2.569,67 ▬	2.321,52 ▬	928,92 ▬	248 ▼
⊕ Frutales	3.438,83 ▬	2.709,87 ▬	1.244,21 ▬	729 ▬
⊕ Industriales	3.718,09 ▲	3.834,23 ▬	616,93 ▲	-116 ▬
⊕ Remolacha Azuc.	4.004,14 ▬	3.598,55 ▬	1.117,40 ▬	406 ▲
⊕ Citricos	7.345,00 ▬	5.804,66 ▬	2.523,14 ▬	1.540 ▼
⊕ Patatas	8.567,68 ▲	7.237,13 ▬	2.654,65 ▲	1.331 ▲
⊖ Hortalizas y Flores	24.357,40 ▬	19.162,84 ▬	7.328,51 ▬	5.195 ▬
Maíz dulce	3.533,59 ▬	2.465,00 ▬	1.271,29 ▬	1.069 ▬
Ajos	9.443,83 ▬	7.115,17 ▬	3.059,38 ▲	2.329 ▲
Zanahorias	9.750,63 ▬	9.697,53 ▲	1.171,26 ▬	53 ▼
Coliflores y brécoles	13.167,90 ▬	9.273,08 ▬	4.709,38 ▬	3.895 ▬
Melones	13.550,29 ▬	11.731,90 ▲	3.111,10 ▬	1.818 ▬
Cebollas	14.442,09 ▬	11.060,78 ▬	4.191,42 ▬	3.381 ▬
Lechugas	15.460,34 ▲	10.422,74 ▬	5.947,08 ▲	5.038 ▲
Tomates	27.102,60 ▲	22.505,08 ▬	7.491,93 ▲	4.598 ▲
Otros vegetales	27.361,04 ▬	22.594,86 ▬	8.093,72 ▬	4.766 ▬
Fresas	77.519,60 ▬	56.855,47 ▬	24.632,28 ▬	20.664 ▬
NACIONAL	2.267,66 ▬	1.941,68 ▬	698,99 ▬	326 ▬

Tabla 18. Ejercicio económico de 2022 de los cultivos de España. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)

En concreto así se posiciona este cultivo con respecto a otros en España según los diferentes índices económicos:



Gráfico 4. Posición del Tomate con respecto a otros cultivos en cuanto a producto bruto. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)

En este gráfico comparativo (Gráfico 4) se observa que el cultivo del tomate presenta alto rendimiento, ya que se posiciona en cuarto lugar en cuanto a la cantidad de tomates (en unidades monetarias) que se producen por hectárea.



Gráfico 5. Posición del Tomate con respecto a otros cultivos en cuanto a Coste de Producción. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)

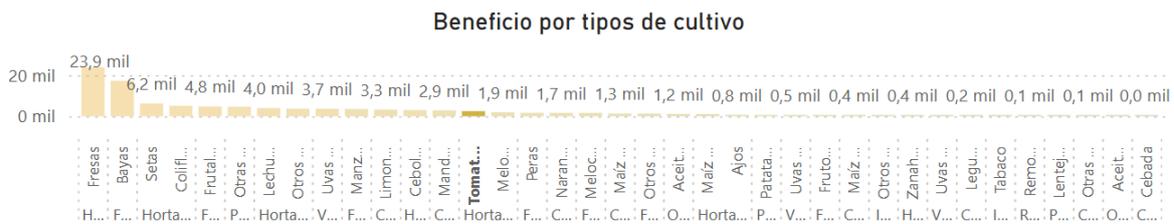


Gráfico 6. Posición del Tomate con respecto a otros cultivos en cuanto a producto bruto. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)

Estos dos gráficos anteriores (Gráfico 5, Gráfico 6) nos muestran que el tomate tiene costes de producción elevados, aunque un valor de beneficios de 4598€/ha en el marco nacional, es más que suficiente para considerarlo un cultivo suficientemente rentable como para plantearse inversiones tecnológicas para su cultivo. Esto es importante en el análisis puesto que en cultivos cuyo margen de beneficio sea mayor se puede plantear la inversión de los drones desde un marco económico más favorable.

A continuación, se adjunta la tabla en concreto para la comunidad autónoma de Extremadura (Tabla 19):

Agrup. cultivo	Producto bruto (€/ha)	Coste producción (€/ha)	Margen neto (€/ha)	Beneficio (€/ha)
⊕ Proteaginosas	854,04 ▲	786,96 ▲	394,39 ▲	67 ▼
⊕ Cult. Forrajeros	887,30 ▬	428,06 ▬	513,17 ▬	459 ▲
⊕ Olivar	1.109,44 ▲	1.254,68 ▬	375,73 ▲	-145 ▬
⊕ Cereales	1.269,32 ▲	1.133,41 ▲	413,40 ▲	136 ▲
⊕ Viñedo	1.493,51 ▬	1.502,36 ▬	484,06 ▬	-9 ▼
⊕ Oleaginosas	1.797,28 ▲	1.373,24 ▲	711,06 ▲	424 ▲
⊖ Hortalizas y Flores	7.866,48 ▬	6.549,33 ▬	1.896,98 ▲	1.317 ▲
Tomates	6.788,09 ▬	5.915,92 ▬	1.400,43 ▲	872 ▲
Otros vegetales	25.917,33 ▲	16.453,79 ▲	11.043,73 ▲	9.464 ▲
⊕ Industriales	8.042,31 ▬	7.705,62 ▬	1.900,54 ▬	337 ▬
⊕ Frutales	9.254,90 ▬	7.882,91 ▬	2.867,10 ▬	1.372 ▬
NACIONAL	2.118,61 ▲	1.912,26 ▬	657,26 ▲	206 ▲

Tabla 19. Ejercicio económico de 2022 de los cultivos de Extremadura. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España).

Los índices económicos presentados en las tablas anteriores han sido calculados como se indica en la Tabla 20.

Producto Bruto = Ventas de cultivos/ganado+ Subvenciones acopladas+ Otros ingresos
Margen Bruto Estándar = Producto bruto –Total costes directos
Margen Bruto =Margen bruto estándar –Maquinaria-Mano de obra asalariada
Renta Disponible = Margen bruto-Total costes indirectos pagados
Margen Neto = Renta disponible-Amortizaciones
Beneficio de la Actividad = Margen neto – Total otros costes indirectos

Tabla 20. Fórmulas para los distintos indicadores económicos. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España)

Haciendo una comparativa de los datos nacionales y los de Extremadura, se observa la significativa diferencia entre el rendimiento (producto bruto), coste de producción y beneficios del cultivo de los tomates en Extremadura en comparación con las cifras nacionales. Esto es significativo para este análisis económico ya que, en zonas como Almería principalmente, el cultivo del Tomate se hace en invernaderos super intensivos donde los elevados costes de producción se deben al uso de avanzadas tecnologías de precisión (Imagen 26), mientras que en provincias como Extremadura, las prácticas de

cultivo son más tradicionales, haciéndose en fincas al aire libre donde la tecnología de los drones es aplicable y hay un campo amplio de mejora.



Imagen 26. Cultivo del Tomate en invernadero en Almería. Fuente: (Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.)

Esta hipótesis es respaldada por el informe interactivo (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España), fuente de los datos, donde se separan los cultivos por categorías y se observa que los tomates en Extremadura se encuentran bajo la categoría de “regadío” y sin embargo en Almería bajo la de “invernadero”. Si observamos los datos económicos del tomate en la provincia de Almería, se ven unos datos de costes de producción 11 veces más elevados que los de Extremadura, pero compensados por unos beneficios 29 veces mayores (Tabla 21).

Agrup. cultivo	Producto bruto (€/ha)	Coste producción (€/ha)	Margen neto (€/ha)	Beneficio (€/ha)
⊕ Viñedo	489,85 ▲	904,26 ▲	76,84 ▲	-414 ▼
⊕ Olivar	907,33 ▬	1.529,02 ▲	56,26 ▼	-622 ▼
⊕ Cereales	429,91 ▬	552,63 ▬	110,23 ▼	-123 ▼
⊖ Hortalizas y Flores	55.672,57 ▬	42.361,53 ▬	19.476,94 ▲	13.311 ▲
Tomates	92.212,20 ▬	67.178,42 ▬	35.257,40 ▲	25.034 ▲
Otros vegetales	47.334,25 ▬	38.473,06 ▬	14.234,36 ▬	8.861 ▲
⊕ Proteaginosas	245,23 ▼	289,74 ▬	63,94 ▼	-45 ▼
⊕ Frutales	383,02 ▼	641,66 ▬	9,47 ▼	-259 ▼
NACIONAL	4.319,56 ▬	3.577,27 ▬	1.415,46 ▬	742 ▬

Tabla 21. Ejercicio económico de 2022 de los cultivos de la provincia de Almería. Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España).

Se debe hacer hincapié en que se está analizando la inversión para fincas de gran extensión, no aplica a cultivos de precisión en invernaderos o similares. Por lo tanto, para el análisis económico se tendrán en cuenta los datos de Extremadura, olvidando la tabla con los datos nacionales.

Para posteriormente realizar la cuenta de resultados, los valores que se han tenido en cuenta no son directamente los del ejercicio de 2022 expuestos en las tablas, sino que se han estudiado los ejercicios desde 2015 hasta 2022 para ver la tendencia. Los diferentes datos se han estudiado realizando gráficas con Excel y obteniendo una aproximación de su tendencia lineal. La ecuación lineal de tendencia obtenida será utilizada posteriormente para calcular los datos en años futuros.

Las gráficas se adjuntan a continuación:

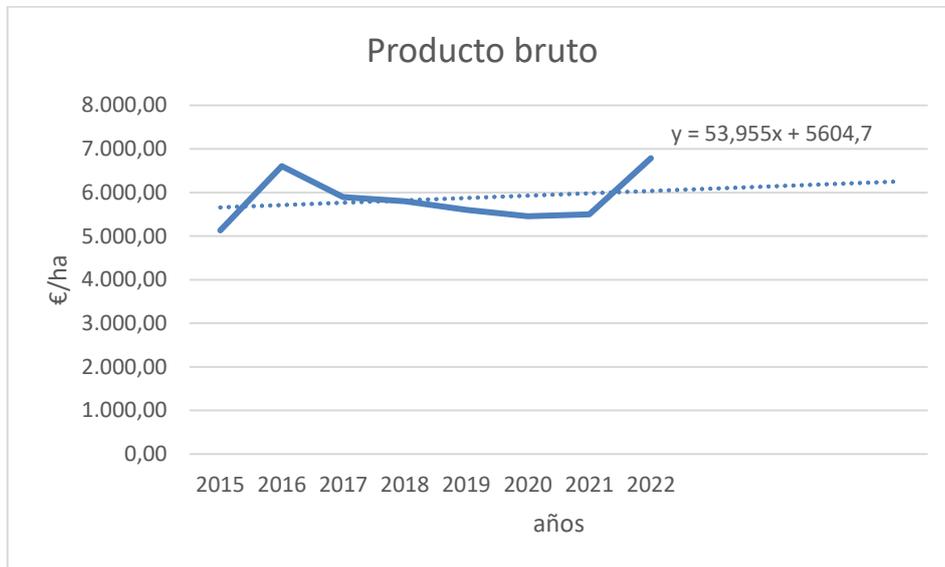


Gráfico 7. Producto Bruto del Tomate en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia

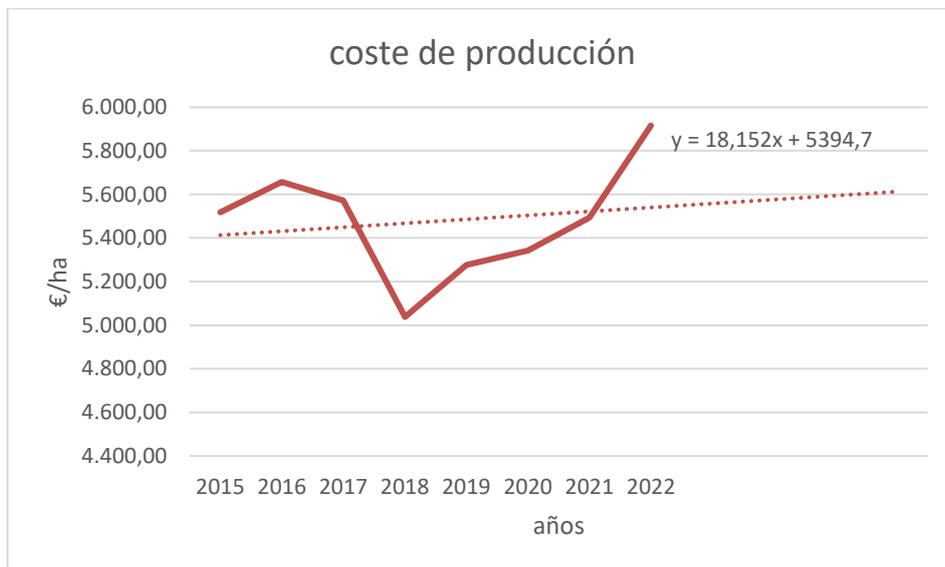


Gráfico 8. Coste de producción del Tomate en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia

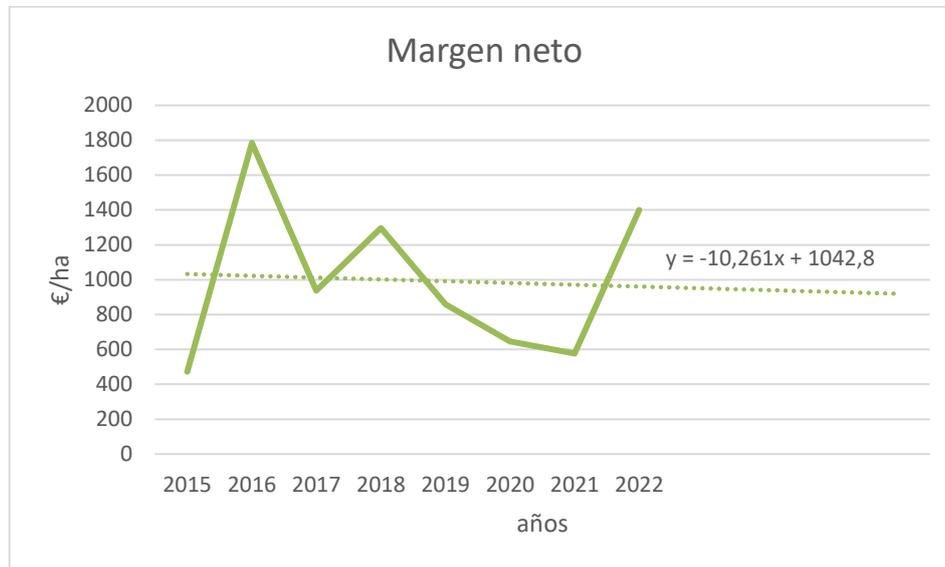


Gráfico 9. Margen neto de la producción de Tomates en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia

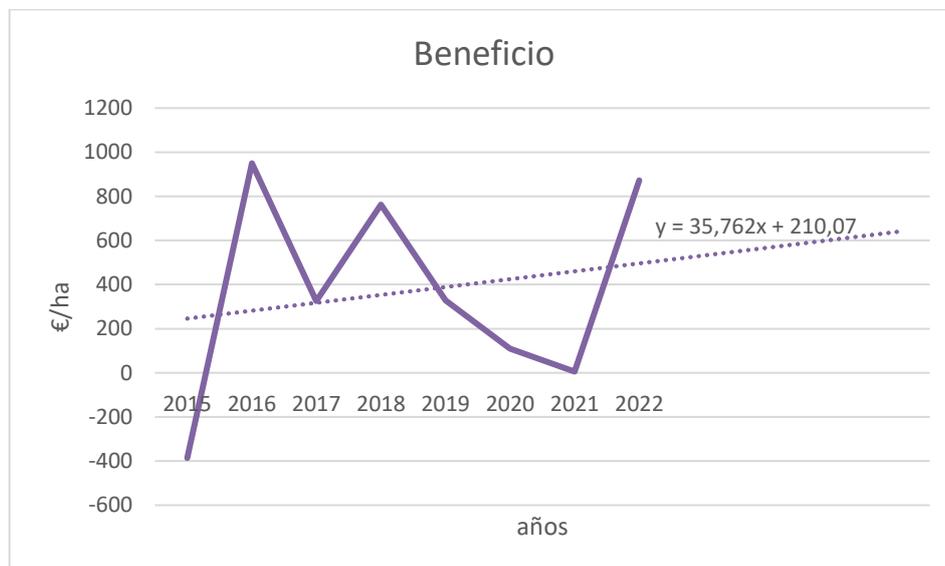


Gráfico 10. Beneficio del cultivo del Tomate en Extremadura en los últimos años. Elaboración propia

Como se observa las tendencias no son lineales, sino que fluctúan, pero por motivos de simplificación se ha aproximado a una tendencia lineal.

5.6 APORTE ECONÓMICO ESPERADO DE LA INVERSIÓN

Para evaluar el beneficio económico de la inversión en la tecnología de los drones es importante tener en cuenta lo que aportan estos a la mejora del rendimiento de la plantación. Como se ha expuesto, el uso de los drones aporta conocimiento preciso, en tiempo real del estado del cultivo: de su salud, zonas con estrés hídrico, peligro de plagas, etc. Esto tiene dos ventajas importantes: en primer lugar, el aumento de la producción, ya que con este seguimiento es posible prevenir pérdidas que en circunstancias normales serían inevitables por causas naturales; En segundo lugar, el ahorro de insumos (agua, luz, herbicidas, etc.) ya que el seguimiento de los cultivos permite la distribución óptima de estos, evitando excesos.

Aunque estas ventajas resultan evidentes, es difícil contabilizarlas ya que, por un lado, la cosecha depende de varios factores que se encuentran fuera de la mano del agricultor como puede ser el clima, y por otro, depende de las buenas decisiones que el agricultor pueda efectuar del seguimiento. Por tanto, habría que hacer un análisis de riesgos, esto es, estimar una cantidad de aumento de producción, y una disminución de costes directos en un margen realista.

Como se ha mencionado, este margen únicamente puede saberse de la experiencia. Según fuentes del sector con las que se ha mantenido el contacto para efectuar este proyecto, el margen de disminución de consumo de agua y otros insumos puede ser del 20 al 25%. En un estudio realizado en 2012 por la revista científica Nature, se estimaba que la agricultura de precisión aumentaría un 29% la producción global (Mueller, 2012). En la página web de mapp, una plataforma online de mapeo con drones se asegura que varios estudios prueban el aumento de producción de hasta un 67% y la reducción de insumos de hasta un 50% (mappa, 2023). Artículos como (The Economic Results of Investing in Precision Agriculture in Durum Wheat Production: A Case Study in Central Italy) donde se han estudiado casos específicos muestran un aumento de margen neto de hasta un 66%. De todas las fuentes que se han buscado, la hipótesis para el estudio económico de este proyecto se va a basar en la experiencia de expertos en el mundo agrario en Extremadura ya que el margen del 20-25% es el más conservador de los citados, y dado que se trata de un contacto de una finca a 4km

del caso estudiado resulta el más relevante. Con una tolerancia del 5% se va a analizar un margen de reducción de insumos del 15-30% y de aumento de producción del 15-30%.

En el ejercicio, la reducción de insumos se va a tratar como un ahorro y el aumento de producción como ingresos. Los porcentajes se efectuarán de la siguiente manera: el ahorro por reducción de insumos se calculará como un porcentaje de los costes directos, y los ingresos por aumento de producción se calcularán como un porcentaje de las ventas.

5.7 CUENTA DE RESULTADOS

Para la cuenta de Resultados se ha tenido en cuenta el producto bruto (ventas), y los costes de producción totales. Los costes directos se han incluido únicamente para el cálculo del ahorro de insumos. Para las ventas y los costes de producción se han tenido en cuenta las ecuaciones obtenidas en las gráficas: Gráfico 7 y Gráfico 8. Para los costes directos se ha tenido en cuenta la siguiente gráfica:

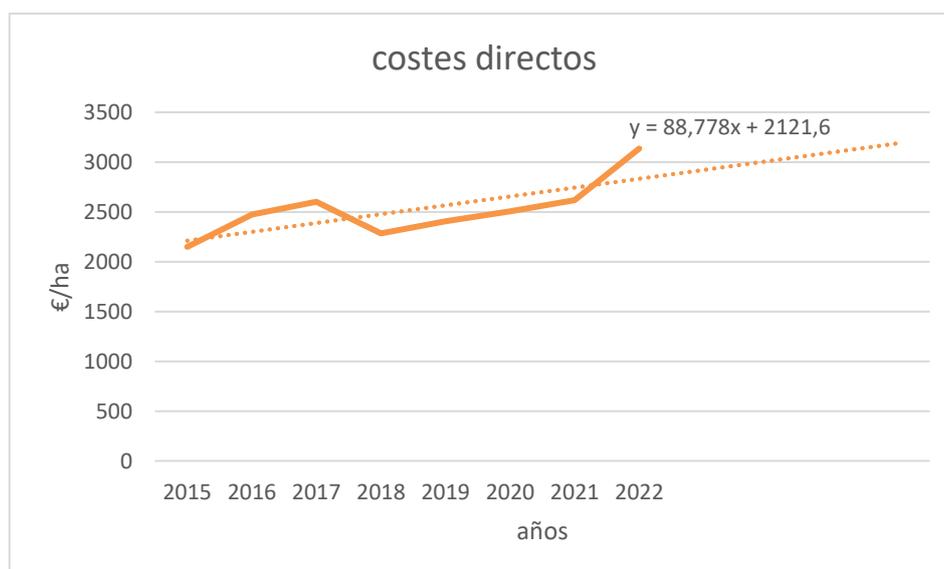


Gráfico 11. Costes directos de la producción de Tomates en la CCAA de Extremadura en los últimos años.

Elaboración propia.

Se ha estudiado la inversión para 4 años ya que no se trata de una inversión a largo plazo porque el activo principal de la inversión, los drones, tienen una vida útil de 4 años.

Se han tenido en cuenta un 2% de inflación y un 9% de descuento.

El procedimiento ha sido el de analizar el beneficio que aportan los drones a la finca. Los flujos de caja están calculados respecto a esto, al igual que el tiempo de payback de la inversión.

A continuación, se adjunta la cuenta de resultados básica de la finca sin la inversión de drones, para visualizar la magnitud de los ingresos de la finca sin la implantación de la tecnología. Se han incluido los datos de Extremadura que se pueden ver en la Tabla 19, multiplicados por las 16,3ha totales de la plantación.

AÑO	0	1	2	3	4
Ventas (€/año)	91.356,61 €	92.236,08 €	93.115,54 €	93.995,01 €	94.874,48 €
Costes producción (€/año)	-87.933,61 €	-88.229,49 €	-88.525,37 €	-88.821,24 €	-89.117,12 €
Beneficio	3.423,00 €	4.006,59 €	4.590,18 €	5.173,77 €	5.757,36 €

Tabla 22. Cuenta de resultados de la finca sin drones. Elaboración propia.

A continuación, se estudia la inversión de los drones. Como se ha mencionado, los ingresos por aumento de productividad se calculan como un porcentaje, en este primer caso un 15%, de las ventas totales. El ahorro de costes directos se calcula también con este mismo porcentaje sobre los costes directos totales que están incluidos en los Costes de Producción de la Tabla 22.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	13.703,49 €	13.835,41 €	13.967,33 €	14.099,25 €	14.231,17 €
Ahorro de costes directos (€/año)	5.187,31 €	5.512,46 €	5.848,54 €	6.195,86 €	6.554,73 €
Aumento de beneficio neto	18.890,80 €	19.347,87 €	19.815,87 €	20.295,11 €	20.785,91 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-15.299,76 €	9.288,21 €	9.615,68 €	9.951,57 €	10.296,15 €
DCfi	-15.299,76 €	8.521,30 €	8.093,33 €	7.684,44 €	7.294,06 €
VAN	-15.299,76 €	-6.778,46 €	1.314,87 €	8.999,31 €	16.293,37 €
TIR	51%				
PB	2 años				

Tabla 23. Flujos de Caja de la inversión con un 15% de aumento de productividad y un 15% de disminución de costes directos. Elaboración Propia.

Enseguida se puede ver que con el mínimo margen sugerido, un 15% de aumento de ingresos y un 15% de ahorro de costes, se puede ver un significativo aumento de los ingresos y una alta rentabilidad de la inversión. Llaman la atención las magnitudes del VAN final y el TIR, que tienen sentido puesto que el resultado esperado es que los beneficios frente al coste de los drones sean altos. La inversión se recupera en tan sólo 2 años con este margen.

A continuación, se adjunta una gráfica comparativa de los beneficios generados por la finca en cuanto a (producto bruto – costes de producción) totales en €/año durante los 4 años estudiados.

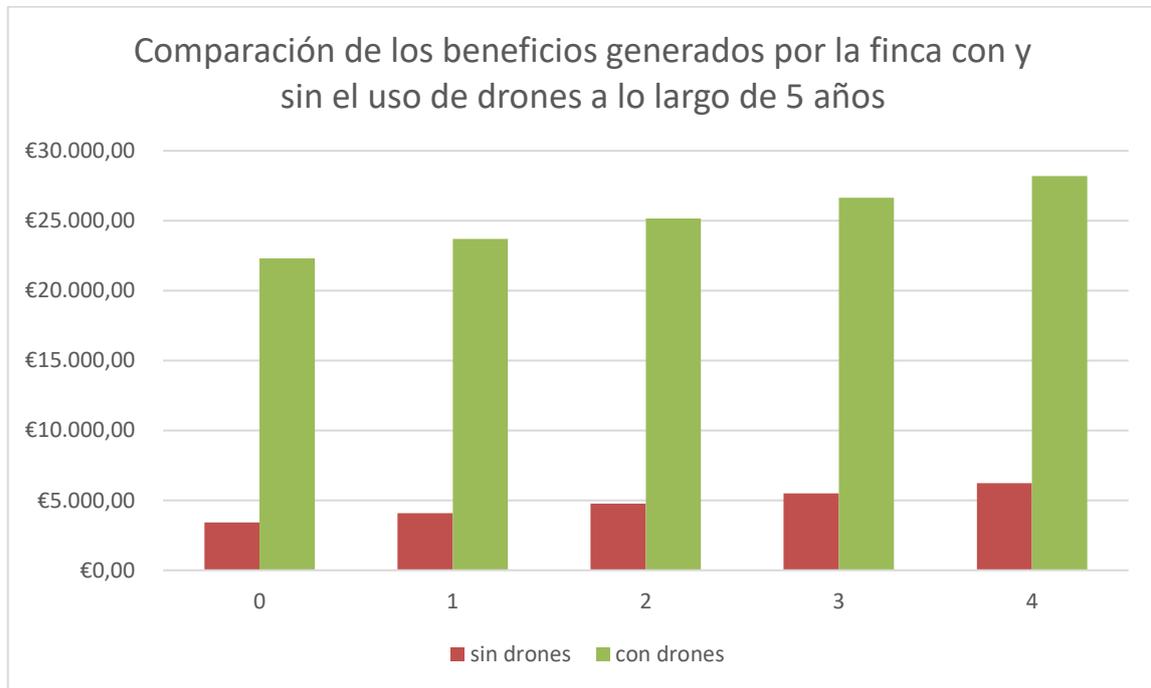


Gráfico 12. Gráfica comparativa de los beneficios generados por la plantación con y sin el uso de drones.

Elaboración propia

La diferencia de los beneficios que una plantación puede generar con la implantación de los drones es muy significativa.

Comparar la cuenta de resultados con el margen máximo propuesto, el de un 30% de aumento de ingresos y un 30% de disminución de costes, no tendría sentido, puesto que ya se observa una alta rentabilidad con el mínimo margen propuesto.

En el análisis se ha tenido en cuenta el mismo porcentaje de disminución de costes que de aumento de producción. Resulta interesante estudiar también distintos márgenes.

En primer lugar, se ha cogido un 15% de aumento de producción y se ha asumido que los costes directos no cambian.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	13.703,49 €	13.835,41 €	13.967,33 €	14.099,25 €	14.231,17 €
Ahorro de costes directos (€/año)	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Aumento de beneficio neto	13.703,49 €	13.835,41 €	13.967,33 €	14.099,25 €	14.231,17 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-20.487,07 €	3.775,75 €	3.767,14 €	3.755,71 €	3.741,42 €
DCfi	-20.487,07 €	3.463,99 €	3.170,72 €	2.900,10 €	2.650,52 €
VAN	-20.487,07 €	-17.023,07 €	-13.852,35 €	-10.952,25 €	-8.301,73 €
TIR	-11%				

Tabla 24. Aumento de producción del 15% sin ahorro de costes. Elaboración propia.

El resultado es que, sin el ahorro de costes, la inversión no sería rentable con un aumento de la producción del 15%. Se ha buscado el margen necesario de aumento de producción para que, sin ahorro de costes, la inversión sea rentable en el tiempo estudiado.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	15.667,66 €	15.818,49 €	15.969,32 €	16.120,14 €	16.270,97 €
Ahorro de costes directos (€/año)	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Aumento de beneficio neto	15.667,66 €	15.818,49 €	15.969,32 €	16.120,14 €	16.270,97 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-18.522,90 €	5.758,83 €	5.769,12 €	5.776,61 €	5.781,22 €
DCfi	-18.522,90 €	5.283,33 €	4.855,75 €	4.460,60 €	4.095,56 €
VAN	-18.522,90 €	-13.239,57 €	-8.383,82 €	-3.923,22 €	172,35 €
TIR	9%				
PB	4 años				

Tabla 25. Aumento de producción del 17,15% sin ahorro de costes. Elaboración propia

El resultado es que el mínimo aumento de producción debería ser de 17,15% para que la inversión sea rentable, con un tiempo de payback de 4 años.

A continuación, se ha hecho el mismo análisis asumiendo un aumento de producción nulo y un ahorro de costes directos del 15%.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Ahorro de costes directos (€/año)	5.187,31 €	5.512,46 €	5.848,54 €	6.195,86 €	6.554,73 €
Aumento de beneficio neto	5.187,31 €	5.512,46 €	5.848,54 €	6.195,86 €	6.554,73 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-29.003,25 €	-4.547,20 €	-4.351,65 €	-4.147,68 €	-3.935,02 €
DCfi	-29.003,25 €	-4.171,74 €	-3.662,70 €	-3.202,77 €	-2.787,66 €
VAN	-29.003,25 €	-33.174,99 €	-36.837,68 €	-40.040,45 €	-42.828,12 €

Tabla 26. Ahorro de costes del 15% sin aumento de producción. Elaboración propia.

El resultado es que el coste de la inversión es mucho más alto que las recompensas generadas, y como se puede observar en el VAN, a lo largo de los años se va perdiendo dinero.

El margen de ahorro de costes mínimo para el cual la inversión sería rentable sin conseguir un aumento de producción debe ser mucho más alto. En concreto de un 41,15%.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Ahorro de costes directos (€/año)	14.230,53 €	15.122,52 €	16.044,50 €	16.997,31 €	17.981,82 €
Aumento de beneficio neto	14.230,53 €	15.122,52 €	16.044,50 €	16.997,31 €	17.981,82 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-19.960,03 €	5.062,86 €	5.844,31 €	6.653,77 €	7.492,07 €
DCfi	-19.960,03 €	4.644,83 €	4.919,04 €	5.137,94 €	5.307,57 €
VAN	-19.960,03 €	-15.315,21 €	-10.396,17 €	-5.258,23 €	49,34 €
TIR	9,1054%				
PB	4 años				

Tabla 27. Ahorro de costes del 41,15% sin aumento de producción. Elaboración propia

Con este ahorro de costes, la inversión teóricamente sería rentable, pero con un VAN de 49,34€ tras cuatro años, el agricultor debería plantearse con cautela la inversión.

Con una gráfica comparativa de los beneficios generados en la plantación con y sin el uso de los drones según los resultados esperados, se puede observar la importancia del aumento de la producción a la hora de analizar la información obtenida con los drones y tomar decisiones en todo el proceso productivo.

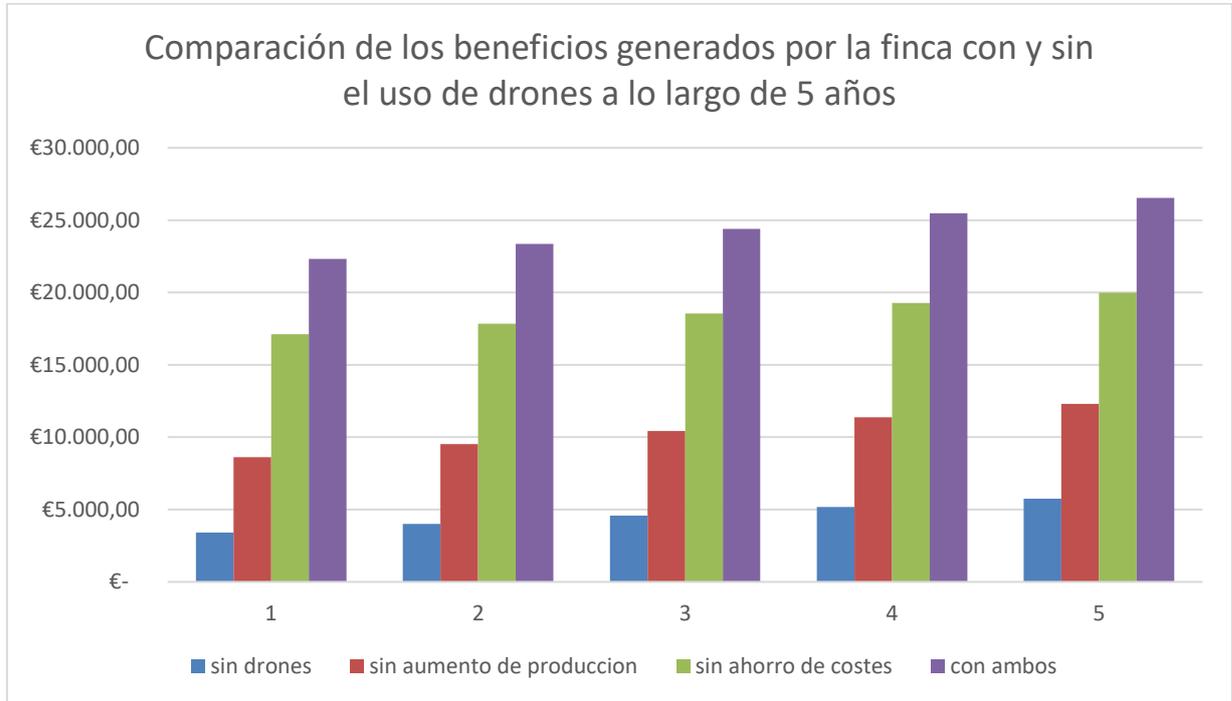


Tabla 28. Gráfica comparativa de los beneficios generados por la plantación con y sin el uso de drones según los diferentes escenarios. Elaboración propia

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ha explicado detenidamente el funcionamiento de los drones, su tecnología, los datos obtenidos a partir de ellos y su utilidad. Se ha visto que con sencillos pasos utilizando softwares especializados, la información obtenida del seguimiento de los drones resulta de gran utilidad para la toma de decisiones del agricultor, para mejorar el proceso productivo, disminuir gastos, aumentar la producción y por tanto aumentar el rendimiento global de la finca.

En este apartado se analizan los resultados del análisis económico, y se sacan conclusiones a partir de ellos.

6.1 MARGEN MÍNIMO DE AUMENTO DE RENDIMIENTO NETO PARA LA RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN

Se ha buscado el margen mínimo de disminución de costes y aumento de ingresos que debería darse en la finca con el uso de los drones para que la inversión sea rentable.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	11.054,15 €	11.160,57 €	11.266,98 €	11.373,40 €	11.479,81 €
Ahorro de costes directos (€/año)	4.184,43 €	4.446,72 €	4.717,82 €	4.997,99 €	5.287,49 €
Aumento de beneficio neto	15.238,58 €	15.607,28 €	15.984,80 €	16.371,39 €	16.767,30 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-18.951,98 €	5.547,63 €	5.784,61 €	6.027,85 €	6.277,55 €
DCfi	-18.951,98 €	5.089,56 €	4.868,79 €	4.654,61 €	4.447,17 €
VAN	-18.951,98 €	-13.862,41 €	-8.993,62 €	-4.339,01 €	108,16 €
TIR	9%				
PB	4 años				

Tabla 29. Cuenta de resultados con un margen del 12,1%, el mínimo para asegurar rentabilidad de la inversión. Elaboración propia.

El resultado ha sido el de un 12,1% de aumento de ingresos y disminución de costes. Con este valor la inversión se recuperaría en el cuarto año, sin embargo, la rentabilidad no es muy alta, como se indica con el VAN.

6.2 MÍNIMO NÚMERO DE HECTÁREAS PARA LA RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN

También resulta interesante buscar el mínimo número de hectáreas de la finca para que la inversión sea rentable. Se debe tener en cuenta que los datos con los que se están haciendo son del cultivo del tomate. En las gráficas ya comentadas Gráfico 4 y Gráfico 5 se puede consultar qué otros cultivos tienen mayores beneficios por hectárea que el tomate, y por tanto plantaciones de menor tamaño se podrían plantear la inversión.

AÑO	0	1	2	3	4
Ingresos por aumento productividad (€/año)	11.055,27 €	11.161,70 €	11.268,12 €	11.374,55 €	11.480,98 €
Ahorro de costes directos (€/año)	4.184,86 €	4.447,17 €	4.718,30 €	4.998,50 €	5.288,02 €
Aumento de beneficio neto	15.240,13 €	15.608,87 €	15.986,43 €	16.373,05 €	16.769,00 €
CAPEX	-27.301,62 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Amortizaciones	0,00 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €	-3.032,94 €
OPEX	-6.888,94 €	-7.026,72 €	-7.167,25 €	-7.310,60 €	-7.456,81 €
Cfi	-18.950,43 €	5.549,21 €	5.786,23 €	6.029,51 €	6.279,25 €
DCfi	-18.950,43 €	5.091,02 €	4.870,16 €	4.655,89 €	4.448,38 €
VAN	-18.950,43 €	-13.859,42 €	-8.989,26 €	-4.333,37 €	115,01 €
TIR	9%				
PB	4 años				

Tabla 30. Cuenta de resultados de una finca de 13,15ha con un margen del 15%. Elaboración propia.

El resultado ha sido que con un 15% de aumento de ingresos y disminución de costes esperados, el mínimo tamaño de la plantación habría de ser de 13,15ha. Aun así, con un VAN de 115,01€ y un payback time de 4 años, el agricultor habría de plantearse la inversión con cautela, o buscar subvenciones.

6.3 SENSIBILIDAD AL EFECTO DE LOS DRONES EN EL RENDIMIENTO DE LA FINCA

Se va a analizar mediante una gráfica comparativa la sensibilidad del VAN de la inversión tras 4 años al aumento del beneficio neto (aumentando el margen de aumento de productividad y disminución de costes)

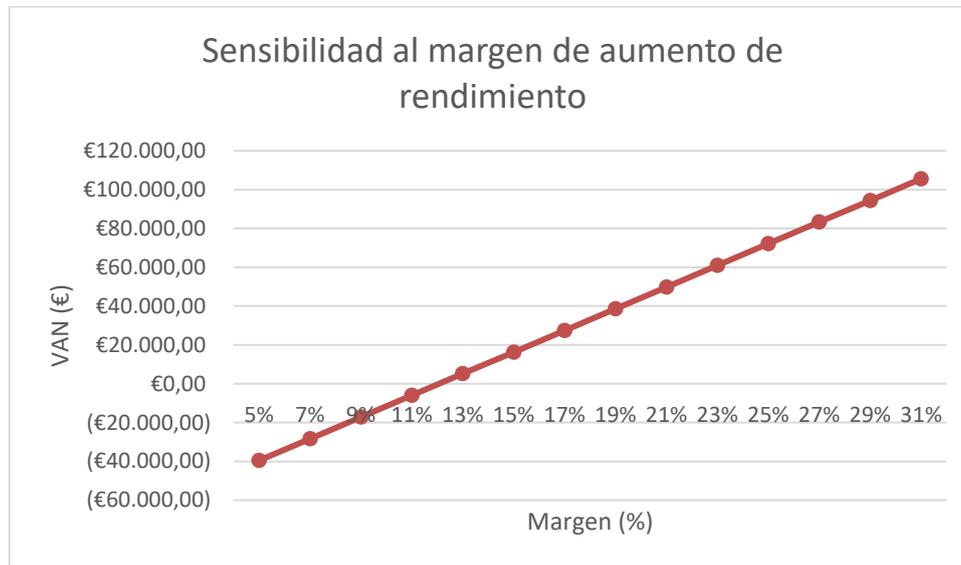


Gráfico 13. Sensibilidad de la rentabilidad de la inversión al porcentaje de aumento de producción y disminución de costes. Elaboración propia.

Se observa una tendencia lineal debida al uso de ecuaciones lineales en los datos. Obteniendo la ecuación de la gráfica ($y = 11162x - 50680$) se concluye que la sensibilidad es igual a 11.162€ al año/%.

6.4 SENSIBILIDAD AL TAMAÑO DE LA FINCA

Se va a analizar mediante una gráfica la sensibilidad del VAN de la inversión tras 4 años al tamaño de la finca



Gráfico 14. Sensibilidad de la rentabilidad de la inversión tras 4 años al tamaño de la plantación.

Elaboración propia

Nótese la tendencia lineal, con ecuación ($y = 10272x - 26335$), es debida al uso de ecuaciones lineales en los datos. La sensibilidad por tanto se concluye que es de 10.272€ al año/ha.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y CUESTIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En este apartado se comentará las conclusiones principales de lo estudiado al igual que sus limitaciones y se hará un comentario de posibles vías de investigación para trabajos futuros

7.1 CONCLUSIONES PRINCIPALES

En el Capítulo 2. de este proyecto se mencionaban las barreras para implantar la agricultura de precisión. Que su coste es percibido como demasiado alto, sin analizar sus ventajas, o que los agricultores hoy en día no tienen conocimientos informáticos suficientes para sacar provecho a la tecnología.

Se ha estudiado en el Capítulo 4. de este proyecto una manera sencilla de manipular los datos obtenidos de los drones para obtener información básica que ya puede resultar valiosa para el agricultor (índices multiespectrales, índices térmicos, imagen RGB de la plantación), y en el análisis económico del proyecto (Capítulo 5.) se ha incluido un curso de formación para pilotar drones.

Realmente es una tecnología que tiene muchas posibilidades para aquellos que se quieran formar en ella; los softwares son cada vez más completos y existen distintos accesorios en el mercado para obtener información cada vez más concreta y precisa, sin embargo, un primer acercamiento para aquellos agricultores que lleven una trayectoria más tradicional, es posible. Los drones son un primer paso ideal hacia la agricultura de precisión, sin necesidad de instalar redes de sensores en la finca, o invertir en maquinaria pesada con GPS, o en sistemas de riego inteligentes. Los drones son capaces de hacer las funciones de estos elementos (mapeo de la finca, riego en zonas específicas, fertilización de las plantas, toma de medida de temperatura...), en un formato compacto y de manera eficiente (con un consumo prácticamente despreciable).

En el análisis económico se ha demostrado que la inversión resulta extremadamente rentable si se cumplen los objetivos esperados. Sin embargo, existe un factor de riesgo, ya que conseguir el aumento de producción y disminución de costes requeridos no depende directamente de los drones, sino de las decisiones del agricultor. Se puede sacar como conclusión la importancia del aumento de producción a la hora de generar beneficios con la tecnología de los drones, por lo que la toma de decisiones del agricultor debe ir centrada al análisis de plagas, del estrés hídrico de las plantas o del correcto uso de fertilizantes para poder asegurar las menores pérdidas de producción posibles.

Se han estudiado también las limitaciones que presentan el uso de los drones: principalmente su autonomía y la normativa existente. La normativa, (Capítulo 2.5) especialmente es un factor que eliminaría la posibilidad de algunos agricultores de usar drones en sus plantaciones, sin ni siquiera haber considerado el factor económico (consúltese mapa: Imagen 3). La autonomía de estos hace que la planificación previa de la ruta del dron sea necesaria para asegurar una cobertura de toda la finca. En el Capítulo 4. se ha simulado el vuelo de los drones para comprobar la autonomía real de estos.

7.2 CONCLUSIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

7.2.1 EXTENSIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En este proyecto se ha discutido la tecnología de los drones, sin embargo, la agricultura de precisión va mucho más allá y existen muchas tecnologías interesantes sobre las que indagar.

Resultaría especialmente interesante estudiar la implantación de un sistema de riego de precisión en la finca, que vaya monitorizado con un software que contenga los datos reales de la finca, y que mediante sensores se active automáticamente según las distintas necesidades en cada zona. Esto no es ciencia ficción, ya que cada vez se está investigando más a cerca del “riego inteligente”, sistemas de riego digitales. El ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España lleva más de 20 años desarrollando un Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) (Raquel Bravo Rubio, 2018), que “es una infraestructura que captura, registra y divulga los datos agroclimáticos

necesarios para el cálculo de la demanda hídrica de las zonas de riego, que permite obtener información útil, rigurosa y de calidad y que contribuye a una mejor planificación, gestión, manejo y control de las explotaciones de regadío”. Su incorporación fue en 2001, y la aplicación es usada por agricultores en todo el país. Resultaría interesante analizar el uso real que le dan los agricultores a esta tecnología, o investigar campos de mejora del sistema. En concreto estos sistemas irían enfocados para la gestión óptima de recursos hídricos, y por tanto contribuirían al ahorro de costes directos.

7.2.2 INDUSTRIA DEL SOFTWARE

Existen numerosos softwares para el análisis de datos agrícolas. En concreto (Pix4D, 2024), tiene varios productos para la manipulación de datos de los drones:

- PIX4Dmatic: Software de fotogrametría de última generación para la cartografía profesional con drones y terrestre.
- PIX4Dmapper: Software de fotogrametría líder para la cartografía profesional con drones.
- PIX4Dfields: Software híbrido de mapeo satelital y dron para análisis aéreo de cultivos y agricultura de precisión.
- PIX4Dreacts: Mapeo rápido 2D para respuesta a emergencias y seguridad pública.
- PIX4Dengine: Motor de reconstrucción de fotogrametría totalmente personalizable.

El mercado de estos softwares es amplio, y aunque hay campo para mejoras, en concreto en la realización de este proyecto se ha encontrado un déficit de softwares de planificación de vuelos.

Las reseñas de los usuarios de las aplicaciones de vuelo de empresas como (DJI Enterprise , s.f.), son significativamente bajas, ya que aseguran que este tipo de aplicaciones dan problemas de compatibilidad, que no funcionan con algunos tipos de drones que pertenecen a la empresa distribuidora de las aplicaciones. Resultaría interesante desarrollar una

aplicación de planificación de vuelos que sea compatible con la mayoría de los drones en el mercado, con tecnología Bluetooth.

7.2.3 LIMITACIONES DEL PROYECTO

Además del campo amplio que aún hay de investigación sobre las distintas tecnologías de la agricultura de precisión, algunas ideas para desarrollar más a fondo el proyecto presentado serían las siguientes:

Estudiar otros drones en el mercado

En este proyecto únicamente se han analizado 2 drones de los muchos que hay en el mercado. Sería interesante hacer un estudio de mercado de los drones. Incluso unificar las funciones de los dos drones en uno y así reducir el CAPEX.

Estudiar todo el proceso de manipulación de los datos

Se ha estudiado de manera básica como manipular los datos de manera que visualmente tengan utilidad para el agricultor, sin embargo, sería interesante explorar todas las posibilidades de este tipo de softwares, a cerca de la información que pueden proporcionar de los datos del dron, así como los distintos análisis estadísticos que se pueden hacer.

Estudio de la toma de decisiones a partir de los datos

El análisis económico del proyecto se ha hecho directamente sobre asunciones de aumento de rendimiento de la plantación. Un estudio interesante pero complejo sería el de ver cómo tomar las decisiones óptimas para obtener los resultados económicos esperados a partir del seguimiento del cultivo. Sería un área de investigación perfecta para ingenieros agrónomos.

Ampliar el contexto del análisis

Este proyecto se ha basado en un ejemplo en concreto, en el de una plantación de Tomates de 16,3ha en Extremadura. Este estudio se podría extrapolar a otros cultivos, o a otras zonas geográficas y ver la viabilidad económica en distintos escenarios.

BIBLIOGRAFÍA

- Adele Finco, G. B. *The Economic Results of Investing in Precision Agriculture in Durum Wheat Production: A Case Study in Central Italy*. *Agronomy* 2021, 11(8), 1520; <https://doi.org/10.3390/agronomy11081520>.
- AESA. (2024). Obtenido de <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/formacion-de-pilotos-a-distancia-de-uas-drones/formacion-de-pilotos-uas-drones-en-categoria-rabiartar>. Último acceso en 13/06/2024
- Barreiro Elorza, Pilar and Valero Ubierna, Constantino (2014). *Drones en la agricultura*. "Tierras de Castilla y León: Agricultura", v. 220 ; pp. 36-42. ISSN 1889-0776.
- BBVA. (21 de diciembre de 2023). www.bbva.com/es/sostenibilidad. Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-agricultura-de-precision-la-gestion-digital-del-campo/>. Último acceso en 13/06/2024
- Bilbao, G., Fuertes, J., & Guibert, J. (2006). *Ética para Ingenieros*. Editorial: Desclée De Brouwer. Libro.
- Sebastián Cantalejo, Marta (2020). *Desarrollo de la agricultura de precisión*. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Diseño Industrial (UPM), Madrid.
- Climograma Nacional*. (s.f.). Obtenido de <https://climogramanacional.es>. Último acceso en 06/03/2024
- DJI Enterprise*. (s.f.). Obtenido de <https://www.dji.com/it/products/enterprise>. Último acceso en 13/06/2024
- Dopacio, C. I. (2024). Economía Circular y Desarrollo Sostenible. Módulo 4: Proyectos de Economía circular y desarrollo sostenible. *Evaluación Financiera*. CEU Universidad San Pablo. Máster en Economía Circular y Desarrollo Sostenible. Material docente.
- ENAIRES Drones*. (21 de 03 de 2024). Obtenido de <https://drones.enaire.es/>. Último acceso en 13/06/2024
- Endesa*. (2024). Obtenido de <https://www.endesatarifasluzygases.com/luz/?sem=bnad:prd:sem:eees:cap:eng:bngs:cpc:pf:pr:gene:luz-comparar:ctp:one:luz:one:txt:txt:na:na:c:o:comparar%20tarifas%20luz:b&msckid=234a1c35413b15a990ab7a785a4d3d51>. Último acceso en 20/05/2024

- Flego, F., & García, E. (2008). *Agricultura de Precisión*. Artículo científico de la revista "Ciencia y Tecnología" de la Universidad de Palermo.
- Geo Innova. (2021). *geoinnova.org*. Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/analisis-de-indices-de-vegetacion-en-teledeteccion/>. Último acceso en 13/06/2024
- Greenfield Technologies. (s.f.). Obtenido de <https://greenfield.farm/monitorizacion-de-cultivos/>. Último acceso en 13/06/2024.
- Gross, R. J. (2023). *Decoding Aerial Technology: Drones Hovering Explained* (2024). Artículo informativo de la página web de la empresa de drones "Propel".
- HP. (s.f.). Obtenido de <https://www.hp.com/it-it/home.html>. Último acceso el 13/06/2024
- González Vizcaíno, Antonia. (2013) Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.. *Introducción al cultivo de tomate en invernadero*. Almería: Junta de Andalucía. Citación,: 1-34 (2013). Material docente.
- Junta de Comercio y desarrollo de las Naciones Unidas. (2015). *El papel de los pequeños agricultores en la producción y el comercio sostenibles de los productos básicos*. Junta de Comercio y Desarrollo. 62º período de sesiones. Ginebra, 14 a 25 de septiembre de 2015. Tema 6 del programa provisional Evolución del sistema internacional de comercio y sus tendencias desde una perspectiva de desarrollo. Informe de la secretaría de la UNCTAD.
- Latam, T. (02 de junio de 2023). *Agricultura 5.0: los impactos de la tecnología aplicada en el sector*. Artículo de blog. Obtenido de <https://es.totvs.com/blog/cat-agroindustria/agricultura-5-0-los-impactos-de-la-tecnologia-aplicada-en-el-sector/>. Último acceso el 13/06/2024.
- mappa. (3 de abril de 2023). Obtenido de <https://mappa.ag/es/blog/guia-agricultura-de-precision/>. Último acceso el 13/06/2024.
- Martinez Rodríguez , A. (2016). *Sistema de procesamiento de imágenes RGB aéreas para agricultura de precisión* . Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Tesis de diploma.
- Mergar, D. (2018). *Agricultura Digital o Agricultura 4.0*. CENCICANA, Director General. Memoria de presentación de resultados de investigación Zafra 2017 – 2018.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España. (s.f.). *Informe interactivo ECREA 2.0*. Obtenido de: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/financiacion-fiscalidad-estudio-costes/ecrea/powerbi-ECREA.aspx>. Último acceso el 13/06/2024.

- Ministerio de la presidencia y para las administraciones territoriales. (29 de diciembre de 2017). Boletín Oficial del Estado. *Real Decreto 1036/2017*. España.
- Mueller, N. D. (21 de Febrero de 2013). *Closing yield gaps through nutrient and water management*. Artículo científico, revista "Nature". DOI: 10.1038/nature11420.
- Murison, M. (30 de diciembre de 2020). *enterprise-insights.dji.com*. (DJI) Obtenido de <https://enterprise-insights.dji.com/es/blog/drones-ala-fija-y-multirrotor>. Último acceso el 13/06/2024.
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals>. Último acceso el 13/06/2024.
- Pix4D. (2024). Obtenido de <https://support.pix4d.com>. Último acceso el 13/06/2024.
- preciodelaluz.com*. (s.f.). Obtenido de <https://preciodelaluz.com/precio-por-meses>. Último acceso el 13/06/2024.
- Raquel Bravo Rubio, D. t. (2018). *El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, SIAR: 20 años de servicio de la sociedad*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Informe.
- Balmes, Florian. RWTH Aachen University. (febrero de 2024). *Introduction to Water Scarcity and Desalination*. Conferencia académica.
- Sede Electrónica del Catastro. Gobierno de España. (s.f.). Obtenido de <https://www.sedecatastro.gob.es/>. Último acceso el 13/06/2024
- Statista. (25 de Mayo de 2023). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com>. Último acceso el 13/06/2024.
- Teledyne Flir. (2021). Radiometric Version of Boson Thermal Imaging Camera Module. Obtenido de <https://www.flir.it/news/camera-cores--components-news/flir-systems-launches-radiometric-version-of-boson-thermal-imaging-camera-module/>. Último acceso el 13/06/2024.
- UMILES. (2024). Obtenido de UMILES UNIVERSITY: <https://umilesgroup.com/university/certificaciones-sts/>. Último acceso el 13/06/2024.
- Volandocondrones. (s.f.). Obtenido de <https://volandocondrones.com/tablets-y-telefonos-para-drone-dji>. Último acceso el 13/06/2024