UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

GRADO EN INGENIERÍA AGROAMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGÍA Y BIOLOGÍA VEGETAL/ INGENIERÍA AGROFORESTAL

Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor/a: **Alae Zaari Assadek**

Tutor/a: **Jesús López Santiago & Sara Mira Pérez**

Septiembre de 2025

AGRADECIMIENTOS

No se me ocurre mejor forma de comenzar este trabajo que dejando constancia de la gratitud que siento hacia mi entorno, las oportunidades que me ha brindado la vida y hacia mí misma. Siempre he pensado que lo más valioso que poseemos es la capacidad de agradecer; es entonces cuando tomamos verdadera conciencia de ello. Como bien dice el relato: *"quien no agradece a las personas, no agradece a Dios"*.

Quiero empezar, con especial cariño, agradeciendo a mi tutora Sara, quien encendió la primera chispa que me motivó a seguir con este trabajo. Su dedicación y orientación han sido fundamentales para poder alcanzar una de las metas que me había propuesto en tan poco tiempo. Es el tipo de profesora que te inspira a querer aprender, y te enseña lo bonita que es la ciencia.

Agradezco también a mi tutor Jesús, quien, pese a mis incertidumbres, aceptó acompañarme en este proyecto y hacerlo posible con su apoyo.

No obstante, todo surgió a partir de una idea y fue gracias a la empresa Camelina Company que esa idea se tradujo en conocimiento. Les agradezco sinceramente su cálida acogida, la atención prestada a todas mis preguntas y la facilitación del material vegetal con el que he podido trabajar.

Asimismo, quisiera añadir una especial mención a las maravillosas compañeras y amigas que hice en la carrera, cuyo apoyo constante y respaldo incondicional han sido una pieza fundamental en la construcción de este trabajo.

Finalmente, y en lo más alto de mis agradecimientos, están mis padres. Les agradezco la paciencia que han tenido conmigo en los momentos de mayor presión, cuando era difícil soportarme, y sobre todo por educarme de una manera que me ha enseñado a ver, valorar y agradecer. La crianza que me han dado y siguen dándome es la antorcha que me guía para encontrar el buen camino.

Agradezco a Dios por darme un propósito en la vida y darme la fuerza necesaria para cumplirlo.

RESUMEN

En un contexto de cambio climático y transición hacia energías renovables, el presente Trabajo Fin de Grado explora la implantación de *Camelina sativa* (L.) Crantz como cultivo adaptado a las particularidades del clima mediterráneo. El estudio se centró en evaluar la germinación de la especie bajo diferentes condiciones ambientales y, de forma complementaria, en analizar la respuesta genética de tres variedades. Para ello, se realizaron tres ensayos controlados en laboratorio, examinando factores determinantes como la temperatura, la disponibilidad hídrica, la salinidad y la luz. Los datos obtenidos fueron sometidos a pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, complementadas con análisis post hoc, lo que permitió identificar diferencias significativas entre tratamientos. A partir del conocimiento generado y de la bibliografía existente, se diseñó una parcela experimental de 1,16 ha en el término municipal de Mora (Toledo). Los resultados mostraron que la camelina presenta una capacidad de germinación adecuada en un rango amplio de temperaturas y una tolerancia moderada al estrés hídrico y salino, lo que confirma su potencial de adaptación a entornos semiáridos mediterráneos. El estudio de campo permitió, además, planificar la distribución de un cultivo piloto integrando criterios agronómicos, ambientales y de viabilidad técnica

ABSTRACT

In the context of climate change and the transition towards renewable energies, this Final Degree Project explores the establishment of *Camelina sativa* (L.) Crantz as a crop adapted to the specific conditions of the Mediterranean climate. The study focused on evaluating seed germination under different environmental conditions and, additionally, on analyzing the genetic response of three distinct varieties. To this end, three controlled laboratory trials were conducted, examining key factors such as temperature, water availability, salinity, and light. The data obtained were analyzed through parametric and non-parametric statistical tests, complemented by post hoc analyses, which allowed the identification of significant differences among treatments. Based on the knowledge generated and supported by the existing literature, an experimental plot of 1.16 ha was designed in the municipality of Mora (Toledo, Spain). The results showed that camelina exhibits adequate germination capacity across a wide temperature range and moderate tolerance to water and salt stress, confirming its potential adaptation to semi-arid Mediterranean environments. Furthermore, the field study enabled the design and planning of a pilot crop by integrating agronomic, environmental, and technical feasibility criteria.

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS 6
ÍNDICE DE TABLAS 9
I. INTRODUCCIÓN 10
1.1. Contexto energético y necesidad de alternativas sostenibles 10
1.2. Justificación del uso de *Camelina sativa (L.) Crantz* como cultivo energético 11
1.3. Descripción de la especie *Camelina sativa (L.) Crantz* 13
1.4. Justificación y relevancia del estudio 15
II. OBJETIVOS 16
2.1. Finalidad del estudio 16
2.2. Objetivo general 16
2.3. Objetivos específicos 17
III. MATERIALES Y MÉTODOS 17
3.1. Material vegetal: 17
3.2. Diseño experimental: 17
a. Condiciones generales de siembra y disposición experimental 17
b. Efecto de la temperatura 18
c. Efecto de la luz 19
d. Ensayo de estrés hídrico y estrés salino 19
3.3. Análisis estadístico 19
IV. RESULTADOS 20
4.1. Efecto de la temperatura 20
4.1.1. Parámetros de germinación 20
4.1.2. Parámetros de raíces y longitud del vástago 25
4.2. Efecto de la luz 30
4.2.1. Parámetros de germinación 30
4.2.2. Parámetros de raíces y longitud del vástago 34
4.2.3. Biomasa 37
4.3. Efecto del estrés hídrico y salino 39
4.3.1. Parámetros de germinación 39
4.3.2. Parámetros de raíces y longitud del vástago 43
4.3.3. Biomasa 46
V. DISCUSIÓN 48
5.1. Efecto de la temperatura 48
5.2. Efecto de la luz 51
5.3. Efecto del estrés hídrico y salino 53

VI. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS 56
VII. PROYECTO: DISEÑO E IMPLANTACIÓN DEL CULTIVO 57
7.1. MOTIVACIÓN Y DIRECTRICES DEL PROYECTO 57
7.2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA 58
7.3. INGENIERÍA DEL PROCESO 62
7.4. EVALUACIÓN FINANCIERA 65
7.4.1. Estimación de costes 65
7.4.2. Estimación de beneficios 68
7.4.3. Flujo de caja 69
7.4.4. Indicadores de rentabilidad 69
7.4.5. Estudio de sensibilidad. Análisis Montecarlo 71
VIII. BIBLIOGRAFÍA 74
IX. ANEJOS 82
Anejo I: Análisis estadístico 82
Anejo II: Situación y localización de la parcela 82
Anejo III: Caracterización edafoclimática de la zona de estudio 82
Anejo IV: Programa y Estudio de maquinaria agraria 82
Anejo V: Evaluación financiera del proyecto 82
Anejo VI: Mapas y planos 82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplar herborizado de Camelina sativa (L.) Crantz conservado en el herbario del Royal Botanic Gardens, Kew. *14*
Figura 2. Comparación de las curvas de germinación ajustadas para las siete temperaturas evaluadas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20 y 30 °C) en tres variedades de Camelina sativa L. Cada gráfica corresponde a una variedad distinta (1, 2 y 3). Las líneas representan el ajuste del modelo de regresión logística y los puntos los valores medios experimentales ± error estándar. *24*
Figura 3. Longitud de radícula (LR) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20, 30ºC). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *26*
Figura 4. Longitud del vástago (LV) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20, 30ºC). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LV ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *28*
Figura 5. Número de raíces secundarias (NR) por cada plántula de C. sativa germinada en diferentes temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20, 30ºC). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de NR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *30*
Figura 6. Curvas de germinación de semillas de Camelina sativa L. de las tres variedades, incubadas en diferentes condiciones lumínicas (exposición completa a la luz, exposición parcial a la luz (MO), y oscuridad absoluta (O)). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones ± error estándar. Las curvas corresponden al ajuste del modelo de regresión logística y se utilizaron para estimar parámetros de velocidad de germinación. *33*
Figura 7. Longitud de radícula (LR) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *34*
Figura 8. Longitud del vástago (LV) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LV ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *36*
Figura 9. Número de raíces secundarias (NR) por cada plántula de C. sativa germinada en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *37*
Figura 10. Peso fresco(PF) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de PF ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *38*

Figura 11. Peso seco (PS) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *39*
Figura 12. Curvas de germinación de semillas de Camelina sativa L. de las tres variedades, incubadas en diferentes condiciones lumínicas (exposición completa a la luz, exposición parcial a la luz (MO), y oscuridad absoluta (O)). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones ± error estándar. Las curvas corresponden al ajuste del modelo de regresión logística y se utilizaron para estimar parámetros de velocidad de germinación. *42*
Figura 13. Longitud de radícula (LR) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *44*
Figura 14. Longitud de vástago (LV) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LV ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *45*
Figura 15. Número de raíces secundarias (NR) por cada plántula de C. sativa germinada en diferentes condiciones estrés: estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de NR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *46*
Figura 16. Peso fresco (PF) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de PF ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *47*
Figura 17. Peso seco (PS) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de PS ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *48*
Figura 18. Esquema del proceso de implantación para el cultivo de C. sativa *63*
Figura 19. Diagrama flujo de caja *69*
Figura 20. Representación de la curva del Valor Actual Neto (VAN) *70*
Figura 21. Peso fresco medio (g) bajo las condiciones Control, EO y ES. Letras distintas indican diferencias significativas (Test Tukey). *87*
Figura 22. Peso seco medio (g) bajo las condiciones V1, V2 y V3. Letras distintas indican diferencias significativas (Test Dunn) *88*
Figura 23. Evolución de la superficie cultivada de Camelina sativa en España. *90*
Figura 24. Distribución de los cultivos de Camelina sativa por España históricamente *92*
Figura 25. Distribución de los cultivos de Camelina sativa por España históricamente *93*
Figura 26. Mapa de localización de la parcela experimental para el cultivo de Camelina Sativa *95*
Figura 27. Mapa de ocupación y pendiente de la parcela experimental para el cultivo de Camelina sativa *97*
Figura 28. Análisis del NDVI de la parcela durante el mes de abril de los años 2023, 2024 y 2025 ..... *99*

Figura 29. Diagrama ombrotérmico del municipio de Mora (2008–2024). Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAR (MAPA, 2024). *103*
Figura 30. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas en los meses de enero y agosto en la estación agroclimática de Mora (2008–2024) *104*
Figura 31. Evolución de la precipitación media anual en el periodo 2008–2024 en el municipio de Mora (Toledo). *106*
Figura 32. Comparación mensual de la precipitación media entre el periodo 2008–2024 y el año 2024 en el municipio de Mora (Toledo). *107*
Figura 33. Balance hídrico mensual medio en el municipio de Mora (Toledo) para el periodo 2008–2024. ..... *108*
Figura 34. Mapa geológico de la parcela experimental, indicando el punto de calicata (perfil S042). Elaboración propia a partir del IGME, Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja 686 Turleque *109*
Figura 35. Horizontes edáficos reconocidos en la calicata S042 ..... *110*
Figura 36. Clasificación textural de los horizontes 2Ab y 2Btb según el triángulo de texturas del USDA, elaborada a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla. *111*
Figura 37. Determinación de la densidad aparente del suelo a partir del contenido de materia orgánica y la textura. *112*
Figura 38. Disponibilidad de nutrientes según el pH del suelo (Castellanos, 2000, citado en Velasco Molina, 2018). *115*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de germinación de tres variedades de la especie Camelina sativa incubadas en distintas temperaturas; 5ºC, 10ºC, 15ºC, 20ºC, 25ºC, 30/20ºC y 30ºC. Cada dato representa la media de cuatro réplicas de germinación ± error estándar. Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad, y letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento. *23*
Tabla 2. Parámetros de germinación de tres variedades de la especie Camelina sativa incubadas en distintas condiciones; luz completa, luz parcial en la parte aérea (MO) y oscuridad completa (O), con 16/8 h de fotoperiodo. Cada dato representa la media de cuatro réplicas de germinación ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes en una fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. *31*
Tabla 3. Parámetros de germinación de tres variedades de la especie Camelina sativa incubadas en distintas condiciones; control, estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO), con 16/8 h de fotoperiodo. Cada dato representa la media de cuatro réplicas de germinación ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes en una fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad (test de Tukey, α = 0,05). *40*
Tabla 4. Matriz multicriterio *62*
Tabla 5. Dosis y costes de fertilizantes aplicados en la parcela (abonado de fondo y cobertera). *64*
Tabla 6. Costes de explotación *67*
Tabla 7. Ingresos de la explotación *68*
Tabla 8. Ejemplo ilustrativo de la prueba de Levene para la variable LR del ensayo 1 ..... *84*
Tabla 9. Ejemplo ilustrativo de la prueba de Shapiro-Wilk de la variable LR del ensayo 1 ..... *85*
Tabla 10. Ejemplo ilustrativo del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al peso fresco (PF) en el ensayo 3 ..... *86*
Tabla 11. Ejemplo ilustrativo de la prueba de Kruskal-Wallis para la variable de Peso seco (Ensayo 3) *87*
Tabla 12. Datos geográficos de la estación agroclimática de Mora (TO12). *102*
Tabla 13. Temperaturas medias, máximas y mínimas registradas en la estación agroclimática de Mora durante el año 2024 ..... *104*
Tabla 14. Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo. Fuente: USDA, 1999 ..... *112*
Tabla 15. Valores pH de los horizontes 2Ab y 2Btb *114*
Tabla 16. Clasificación de la salinidad del suelo según la conductividad eléctrica (CE) a 25 °C. Fuente: USDA, 1999 ..... *115*
Tabla 17. Fenología de una variedad invernal de C. sativa *121*
Tabla 18. Fenología de una variedad primaveral de C. sativa (Camelina Company, 2020) *121*
Tabla 19. Cronograma de labores *123*
Tabla 20. Maquinaria a emplear en la parcela *124*
Tabla 21. Resumen anchuras útiles de trabajo (a_u) y capacidades efectivas de trabajo (C) *124*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto energético y necesidad de alternativas sostenibles

Todo país aspira a garantizar su estabilidad, y uno de los factores clave que condicionan dicha situación es la autosuficiencia en recursos esenciales como la energía y los alimentos. No obstante, lograr un equilibrio sostenible entre ambas dimensiones constituye uno de los grandes retos del siglo XXI. En las últimas décadas, la Unión Europea y, en particular, España, han incrementado su dependencia energética respecto a terceros países, alcanzando en 2019 un índice de dependencia del 60 % y del 70 %, respectivamente. Estos datos indican que más de la mitad de la energía consumida, en ambos panoramas, proceden de fuentes importadas siendo principalmente petróleo y gas natural (Balteanu & Viani, 2023). Esta elevada dependencia externa expone a las economías europeas a importantes vulnerabilidades frente a disrupciones geopolíticas o comerciales. Un ejemplo reciente de esta fragilidad se evidenció en 2022, cuando la invasión rusa de Ucrania marcó un punto de inflexión en el sistema energético global. La drástica reducción de las importaciones de gas y petróleo procedentes de Rusia provocó un aumento sin precedentes en los precios de la energía, acelerando la inflación y poniendo en riesgo la seguridad energética de Europa (IEA, 2023; Balteanu & Viani, 2023). Además de sus consecuencias económicas y geopolíticas, esta dependencia estructural de los combustibles fósiles conlleva un elevado coste ambiental, lo que refuerza la urgencia de replantear el modelo energético actual.

En este sentido, la transición energética responde a una decisión consciente de nuestras sociedades ante la emergencia climática y la necesidad de garantizar el suministro seguro y sostenible de energía (Linares, 2018). En consecuente, la Unión Europea ha establecido un marco legislativo claro a través del Pacto Verde Europeo, cuyo objetivo es alcanzar la neutralidad climática en 2050, reduciendo para 2030 las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % respecto a los niveles de 1990 y aumentando significativamente la participación de energías renovables en el mix energético (Consejo de la Unión Europea, 2024).

Por otro lado, cobra especial importancia avanzar hacia un modelo energético descentralizado, en el que la generación y gestión de la energía no dependan exclusivamente de grandes infraestructuras o de un reducido número de agentes dominantes. Este modelo no solo favorece la resiliencia frente a crisis geopolíticas o fallos

en el suministro, sino que también promueve la diversificación de fuentes y el desarrollo local. Dentro de este enfoque, los biocombustibles emergen como una alternativa estratégica: combustibles líquidos o gaseosos, empleados para el transporte, producidos a partir de biomasa, según la definición de la Directiva (UE) 2018/2001. Además, su uso se asocia a un balance de carbono neutro o casi neutro puesto que el dióxido de carbono emitido durante su combustión puede ser compensado por el captado en la fase de crecimiento de las plantas de origen, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático.

Una de las principales vías para la obtención de este producto son los cultivos energéticos; especies vegetales seleccionadas y manejadas específicamente para la producción de biomasa con fines energéticos, ya sea en forma de biocarburantes líquidos, biogás o biomasa sólida. Entre las especies actualmente investigadas, destaca el interés creciente en determinadas oleaginosas como *Camelina sativa (L) Crantz*, cuya rusticidad, bajo requerimiento de insumos y adaptabilidad a condiciones adversas, como se corroborará en el presente estudio, la sitúan como una candidata relevante para su uso en zonas semiáridas. Estas características justifican su evaluación técnica como alternativa sostenible en la producción de biocombustibles avanzados.

1.2. Justificación del uso de *Camelina sativa (L.) Crantz* como cultivo energético

La elección de *C. sativa* como objeto de este trabajo responde a un conjunto de características agronómicas, fisiológicas y ecológicas que la convierten en un cultivo con potencial para producir biocarburantes de forma sostenible.

En primer lugar, resulta relevante señalar la capacidad de dicha especie para desarrollarse en suelos marginales. Según la FAO (2022), las tierras agrícolas marginales son aquellas con bajo potencial productivo debido a limitaciones biofísicas como pendiente, baja calidad del suelo, salinidad o escasa disponibilidad hídrica, que dificultan el desarrollo de una agricultura intensiva y sostenible. Esta característica ha sido ampliamente documentada por Zanetti et al. (2013), quienes destacan que la especie presenta una notable tolerancia a condiciones edáficas desfavorables y requiere un bajo nivel de insumos para su cultivo. De este modo, la implantación de *C. sativa* en tierras marginales permitiría evitar la competencia directa con cultivos alimentarios, ofreciendo una alternativa viable para diversificar los sistemas agrarios y contribuir a la producción

sostenible de biocombustibles sin comprometer la seguridad alimentaria (Zanetti et al., 2013).

Por otro lado, un aspecto destacado de *C. sativa* es su rusticidad y bajo requerimiento de insumos fitosanitarios. Según Séguin-Swartz et al. (2009), esta especie presenta una elevada resistencia natural frente a enfermedades y plagas, lo que permite su cultivo sin necesidad de aplicar pesticidas de forma intensiva. Este atributo no solo reduce los costes de producción, sino que también disminuye el impacto ambiental asociado al uso excesivo de productos fitosanitarios. Además, diversos estudios señalan que los cultivos de *C. sativa* pueden desempeñar un papel positivo en la conservación de la biodiversidad, al proporcionar recursos florales para insectos polinizadores y otros organismos beneficiosos (Eckberg et al., 2011).

Asimismo, destaca su elevado contenido en lípidos, alcanzando aproximadamente un 35–40 % en semilla, tal como señalan Ciubota-Rosie et al. (2013) en su estudio de caracterización integral de la especie y que también queda reflejado en el Seed Information Database (SID, 2023). Según estas fuentes, el perfil lipídico de *C. sativa* se caracteriza por un alto contenido en ácidos grasos insaturados, lo que refuerza su idoneidad como fuente de energía alternativa. Este predominio de compuestos como el ácido oleico (C18:1) y el ácido linoleico (C18:2) resulta especialmente ventajoso para la producción de biocarburantes. Su estructura química, marcada por la presencia de dobles enlaces, les confiere puntos de fusión más bajos que los ácidos grasos saturados, como el palmítico o el esteárico. Esto mejora las propiedades del biodiésel obtenido, al permitir una mayor fluidez a bajas temperaturas y un mejor rendimiento en motores en climas fríos. Además, los aceites ricos en ácidos insaturados presentan una menor viscosidad, lo que facilita su conversión en ésteres metílicos mediante transesterificación y optimiza su combustión. Por estas razones, los ácidos grasos insaturados son considerados más adecuados para aplicaciones energéticas que requieren eficiencia tanto en el procesamiento como en el rendimiento final del biocombustible (Knothe, 2005).

Otro rasgo destacable es su posible efecto alelopático, es decir, la capacidad de influir en el crecimiento de otras especies vegetales mediante la liberación de compuestos químicos. Lovett y Jackson (1980) demostraron que los lavados foliares de *C. sativa*, en presencia de ciertas bacterias del filoesfera como *Enterobacter cloacae* y *Pseudomonas fluorescens*, promovían el desarrollo radicular de especies como *Linum usitatissimum*. Este fenómeno

sugiere que el cultivo podría desempeñar un papel positivo en sistemas de rotación o como cultivo de cobertura, favoreciendo la implantación de especies posteriores.

Finalmente, cabe destacar la adaptabilidad de *C. sativa* a condiciones edáficas y climáticas limitantes, como suelos semiáridos y con problemas de salinidad. Hunsaker et al. (2011) demostraron que esta especie presenta un bajo requerimiento hídrico y una elevada eficiencia en el uso del agua, obteniendo rendimientos aceptables incluso en regiones áridas como el suroeste de Estados Unidos. Los autores señalan que el cultivo de camelina demandó, durante el periodo experimental, aproximadamente la mitad del volumen de agua requerido por otros cultivos extensivos tradicionales en la misma región, como trigo o cebada. Asimismo, la *C. sativa* mostró un comportamiento favorable frente a la salinidad y al déficit hídrico, lo que refuerza su potencial como cultivo estratégico en entornos con recursos hídricos limitados (Hunsaker et al., 2011).

En conjunto el desarrollo de este cultivo contribuye de manera directa al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 2 (Hambre cero).

1.3. Descripción de la especie *Camelina sativa (L.) Crantz*

C. sativa, conocida comúnmente como camelina o lino bastardo, es una planta herbácea perteneciente a la familia *Brassicaceae* o *Cruciferae*, dentro del orden *Brassicales*. Se trata de una especie anual que muestra una notable adaptabilidad a diferentes ambientes, aspecto que ha favorecido su expansión y uso agronómico en diversas regiones de Europa y Asia Central.

Desde un punto de vista morfológico, la camelina presenta un porte erecto, alcanzando alturas comprendidas entre 20 y 100 centímetros. Su sistema caulinar es ramificado y está recubierto por un indumento característico formado mayoritariamente por pelos ramificados, aunque en algunos individuos pueden observarse pelos simples de forma esporádica. La parte basal de la planta suele estar formada por una roseta de hojas basales, que son pecioladas, de morfología lanceolada a oblonga, con el margen entero o ligeramente dentado. Por su parte, las hojas caulinares son sésiles, de menor tamaño, con base claramente auriculada, lo que constituye un rasgo distintivo de la especie. En la Figura 1 se muestra un ejemplar herborizado de *C. sativa* conservado en el Royal Botanic Gardens de Kew.

Figura 1. Ejemplar herborizado de Camelina sativa (L.) Crantz conservado en el herbario del Royal Botanic Gardens, Kew.

La inflorescencia está formada por racimos alargados. Las flores son pequeñas y tetrámeras, compuestas por cuatro sépalos erectos, de entre 2,7 y 3 mm de longitud, que presentan una ligera gibosidad en la base. Los pétalos son obovados, de color amarillo pálido, y miden entre 3,7 y 5 mm. El androceo presenta cuatro estambres largos y dos cortos, mientras que el gineceo se caracteriza por un estilo corto y un estigma capitado. El fruto de la camelina es una silícula obovoide, con valvas convexas que se estrechan bruscamente hacia el ápice. Su longitud oscila entre 7 y 9 milímetros, y en su interior alberga un número elevado de semillas pequeñas, dispuestas en dos filas. Las semillas, de entre 1,5 y 2,2 mm de longitud, son de color marrón-amarillento y presentan una forma oblonga. Este alto número de semillas, junto a su contenido en ácidos grasos poliinsaturados, especialmente ácido linolénico, confiere a la especie un considerable interés como materia prima para la obtención de aceites industriales y biocombustibles sostenibles (García Adá, 1977). Neupane et al (2022) indican que la especie desarrolla una raíz pivotante típica de las Brassicaceae, con raíces secundarias laterales menos desarrolladas. No obstante, la profundidad radicular no presenta unos valores

homogéneos, variando en función de las condiciones ambientales. Hunsaker et al (2011) estiman que el crecimiento radicular efectivo puede alcanzar hasta 1.4 m de profundidad. Por otro lado, trabajos como los de Pavlista et al. (2016) y Kovar et al. (2023) muestran que el crecimiento es en torno a 1 m, aunque destacan que la mayor densidad de raíces se concentra en los primeros 15 cm del suelo.

1.4. Justificación y relevancia del estudio

La creciente necesidad de identificar cultivos adaptables a condiciones de baja disponibilidad de recursos ha llevado al estudio de especies como *C. sativa*, valorada por su rusticidad, bajo requerimiento hídrico y contenido en aceite adecuado para la producción de biocombustibles. Aunque diversos trabajos han analizado su respuesta a factores abióticos como la temperatura, el estrés hídrico o la salinidad, la variabilidad entre variedades no ha sido ampliamente explorada bajo un enfoque comparativo. En este contexto, el presente trabajo se plantea como un caso práctico experimental en condiciones controladas, con el objetivo de evaluar la respuesta germinativa de tres variedades de *C. sativa* con distintos requerimientos de vernalización: CCE26 (primavera, sin requerimientos), CCE44 (invierno facultativa) y BLC000445 (invierno estricta).

Además de caracterizar la especie y su respuesta, durante las primeras fases de germinación, frente a condiciones de estrés climático (variaciones en las temperaturas, condiciones de estrés hídrico y salino), estudiar el efecto de la luz en la germinación es de especial interés para determinar si la especie presenta algún tipo de dormición asociada a la sensibilidad lumínica y, en consecuencia, establecer las medidas agronómicas más adecuadas para optimizar su implantación. La luz constituye un factor ambiental clave en la regulación de la germinación, actuando tanto como desencadenante del proceso como modulador de su velocidad. Esta influencia está estrechamente relacionada con la dormición, entendida como la incapacidad de una semilla viable para germinar pese a encontrarse en condiciones ambientales aparentemente favorables (MAPA, 1993). Tal como señalan Bewley y Black (1994, citados en Yan y Chen, 2020), numerosos estudios han evidenciado que la percepción lumínica puede inducir cambios hormonales que favorecen la germinación, principalmente mediante la reducción del ácido abscísico (ABA) y la activación de la síntesis de giberelinas (GA). Este proceso está mediado por el sistema de fitocromos, que permite detectar la calidad y duración de la luz y regula genes clave como *GA3ox1* y *GA3ox2*, implicados directamente en la biosíntesis de GA (Seo et al., 2009).

Desde el punto de vista formativo, este trabajo se alinea con los principios de la Ingeniería Agroambiental al integrar la experimentación aplicada con la búsqueda de soluciones agrarias sostenibles. El estudio propone un enfoque técnico centrado en el aprovechamiento de especies energéticas adaptadas a condiciones limitantes, con el fin de promover el uso eficiente del suelo y la diversificación productiva en zonas de baja fertilidad. La combinación de conocimientos fisiológicos, agronómicos y territoriales aporta al proyecto una dimensión práctica y multidisciplinar, alineada con los retos del desarrollo rural y la transición energética.

II. OBJETIVOS

2.1. Finalidad del estudio

El estudio tiene como finalidad proponer una estrategia de valorización de suelos agrícolas poco aprovechados y la búsqueda de un cultivo alternativo que puedan contribuir, desde una perspectiva local, a modelos agronómicos más sostenibles. A largo plazo, se aspira a fomentar sistemas de producción compatibles con la transición energética y con los objetivos de descarbonización del sector agrario y energético. También se espera que la implantación del cultivo permita evaluar su rentabilidad y su posible aprovechamiento económico en zonas rurales.

Dada su naturaleza experimental, este trabajo también busca generar conocimiento sobre la fisiología germinativa de *C. sativa*, con el objetivo de comprender y, en consecuencia, optimizar su establecimiento temprano en campo, facilitando su integración en programas de cultivo con interés agronómico e industrial.

2.2. Objetivo general

El objetivo general de este estudio técnico es analizar la capacidad de germinación de *C. sativa* en distintas condiciones de temperatura, salinidad, estrés hídrico y condiciones lumínicas, con el fin de identificar la respuesta de la especie y concretar que variedad responde mejor ante factores limitantes típicos del entorno mediterráneo. A partir de estos resultados, se busca justificar la implantación del cultivo en una parcela de 1,16 ha situada en el municipio de Mora (Toledo), orientada a la producción de semilla para usos industriales.

2.3. Objetivos específicos

- Evaluar la germinación de tres variedades comerciales de *C. sativa* bajo diferentes temperaturas, con el fin de estimar su adaptabilidad térmica y orientar la elección del periodo de siembra en condiciones mediterráneas.
- Analizar el efecto del estrés abiótico, tanto hídrico como salino, sobre la germinación, para valorar su tolerancia a condiciones de sequía y su necesidad potencial de riego.
- Determinar el comportamiento de las semillas en presencia/ausencia de la luz y sus respuestas al respecto, como criterio para definir el sistema de siembra más adecuado desde el punto de vista técnico y económico.
- Aplicar los resultados experimentales para valorar la idoneidad del cultivo en entornos mediterráneos, incluyendo suelos marginales, y justificar su implantación en una parcela de 1,16 ha destinada parcialmente a producción de semilla y, con posibilidad de uso, a fines académicos o demostrativos.
- Generar un retorno económico positivo a medio plazo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material vegetal:

Los ensayos fueron realizados con semillas de tres variedades comerciales de *C. sativa*, suministradas por la empresa Camelina Company España. Estas fueron:

- Variedad 1: CCE26, de ciclo de primavera, sin requerimientos de vernalización.
- Variedad 2: CCE44, variedad de invierno facultativa, con requerimientos de vernalización no estrictos.
- Variedad 3: BLC000445, variedad de invierno con requerimientos de vernalización estrictos. Sin horas de frío no florece.

Las semillas fueron almacenadas a temperatura ambiente y en condiciones de baja humedad durante un breve periodo (días), hasta el inicio de los ensayos.

3.2. Diseño experimental:

a. Condiciones generales de siembra y disposición experimental

Los ensayos de germinación se realizaron con 4 repeticiones de 20 semillas de camelina que se dispusieron en placas de Petri de 15 mm con dos láminas de papel de filtro y 14

ml de disolución en función del tratamiento a estudiar. En el caso de los ensayos que evaluaron el efecto de la temperatura y luz, se utilizó agua destilada. No obstante, para los ensayos de estrés osmótico y salino se emplearon disoluciones preparadas específicamente, descritas en sus respectivos apartados. Las placas se sellaron con Parafilm para evitar la pérdida de humedad y se colocaron verticalmente dentro de las cámaras de germinación, para poder apreciar el crecimiento de las radículas.

El seguimiento de la germinación se realizó durante siete días. Durante los tres primeros días se realizaron varios conteos diarios (entre tres y cinco), mientras que en los días siguientes se redujo la frecuencia, ya que la tasa de germinación se estabilizaba.

En los ensayos realizados en condiciones de oscuridad, las placas se observaron en una habitación a oscuras utilizando luz verde para hacer los recuentos de germinación**.** Según Liu y W. van Iersel (2021), se considera la luz verde como un sustituto funcional de la oscuridad durante la germinación, que no activa procesos fotosintéticos relevantes ni afecta significativamente la respuesta germinativa.

Al finalizar el ensayo, se contabilizó la germinación de cada placa y se procedió a la toma de fotografías de las plántulas germinadas, con el fin de medir la longitud de radícula y vástago. Para ello, las imágenes fueron posteriormente analizadas con ayuda del software ImageJ y se calcularon los valores medios y el error estándar.

Ese mismo día se determinaron los pesos frescos de las plántulas. Para ello, se recogieron cuidadosamente todas las plántulas germinadas de cada placa y se pesaron en una balanza de precisión, y a partir del peso total se calculó el peso neto de la parte aérea. Las muestras se secaron posteriormente en estufa a 65ºC durante 15 horas**,** tras lo cual se repitió el pesado siguiendo el mismo procedimiento, obteniéndose así el peso seco total por placa. De forma similar a los casos anteriores, se calcularon las medias y los errores estándar.

b. Efecto de la temperatura

El ensayo de temperatura se llevó a cabo con el objetivo de identificar el rango óptimo de germinación para *C. sativa*. Los resultados obtenidos permitieron establecer la temperatura más adecuada para llevar a cabo los ensayos posteriores sin que este factor condicionase los resultados.

Se evaluaron las siguientes condiciones de temperatura: 5 ºC, 10 ºC, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 ºC y temperatura alternante 30 °C / 20 °C. En todos los casos se aplicó un fotoperiodo

de 16 horas de luz y 8 de oscuridad excepto a 5 ºC que los ensayos se realizaron en oscuridad.

c. Efecto de la luz

Este ensayo tuvo como objetivo identificar la respuesta de las semillas a la presencia o ausencia de luz durante la germinación. Los ensayos se hicieron en tres condiciones: 1) exposición a la luz de la plántula al completo, tanto en parte aérea como raíz (L); 2) incubación en oscuridad de la plántula al completo, tanto la parte aérea como raíz (O); y exposición a la luz sólo de la parte aérea de la plántula, manteniéndose la raíz en oscuridad (MO).

Las variedades 1 y 2 se incubaron a 25 °C, mientras que la variedad 3 a 20 °C. En los ensayos de luz se aplicó un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 de oscuridad. El periodo de incubación fue de siete días, manteniéndose el protocolo de seguimiento, recuento de germinación y análisis final descrito en el apartado a.

d. Ensayo de estrés hídrico y estrés salino

Se estudiaron los efectos del estrés hídrico y estrés salino sobre la germinación de las semillas de *C. sativa*. Para simular condiciones de estrés hídrico en la placa, se preparó una disolución de polietilenglicol (PEG) con un potencial osmótico de −0,7 MPa.

Para simular condiciones de estrés salino en la placa, se preparó una disolución de cloruro sódico (NaCl) con un potencial osmótico de −0,7 MPa.

Ambos tratamientos se compararon con un control incubado en agua destilada y las mismas temperaturas utilizadas en el apartado anterior. Se midió la conductividad eléctrica de las disoluciones para su posterior análisis.

El procedimiento de siembra, seguimiento y toma de datos fue el mismo descrito en el apartado a.

3.3. Análisis estadístico

En este trabajo se evaluó el efecto de la genética (variedad) y de las condiciones ambientales sobre la germinación y el desarrollo inicial de *C. sativa,* considerando también, cuando fue posible, la interacción entre ambos factores. Los análisis se realizaron con el software RStudio (v. 4.4.2).

En el caso de las variables longitud de raíz y radícula, número de raíces secundarias y biomasa, se procedió en primer lugar a verificar los supuestos para la aplicación de ANOVA mediante el test de Shapiro–Wilk (normalidad) y el test de Levene (homogeneidad de varianzas). Cuando ambos criterios se cumplieron, se aplicó un ANOVA bifactorial, seguido de la prueba post hoc Tukey HSD.

En los casos en que no se cumplieron los supuestos, se revisó la posible presencia de valores atípicos mediante un análisis descriptivo apoyado en la inspección de diagramas de caja (*boxplots*) y gráficas Q–Q. y, si persistía la falta de normalidad u homogeneidad, se realizó un análisis estratificado con el fin de responder a dos cuestiones:

- si la variedad influía en la respuesta bajo una condición ambiental fija
- si la condición ambiental afectaba la respuesta de una variedad concreta.

Para cada uno de estos análisis independientes se repitió la comprobación de supuestos. Cuando estos no se cumplieron, se optó por la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, que permite comparar más de dos grupos independientes sin requerir distribución normal (Ostertagová et al., 2014), seguida del test post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni.

Para una descripción detallada de los procedimientos estadísticos, se puede consultar el Anejo I.

IV. RESULTADOS

4.1. Efecto de la temperatura

4.1.1. Parámetros de germinación

El presente ensayo estudió el efecto de siete temperaturas 5ºC, 10ºC, 15ºC, 20ºC, 25ºC, 30ºC y 30/20ºC sobre la germinación en semillas comerciales de tres variedades de *C. sativa*, que presentan distintos requerimientos de vernalización: CCE26 (variedad 1), CCE44 (variedad 2) y BLC000445 (variedad 3). Este enfoque permitió determinar la sensibilidad de las semillas frente a cambios térmicos, evaluando si existen diferencias significativas entre tratamientos y/o variedades.

A continuación, se presentan los resultados de germinación obtenidos para las tres variedades de *C. sativa* bajo diferentes temperaturas. En la Tabla 1 se recogen los valores medios de los principales parámetros evaluados, mientras que la Figura 2 compara las

curvas de germinación ajustadas de las tres variedades, permitiendo una visión global de su comportamiento.

En relación con el porcentaje final de germinación, al analizar el efecto de la temperatura dentro de cada variedad, no se identificaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos térmicos (Tabla 1, letras minúsculas). En todas las condiciones de germinación evaluadas, la germinación final fue elevada y sin diferencias significativas entre las distintas temperaturas, lo que indica una alta tolerancia de las semillas a la variación de temperatura durante el proceso germinativo.

No se observaron diferencias significativas en la germinación entre las variedades evaluadas en las distintas temperaturas, excepto a 30 °C (Tabla 1, letras mayúsculas). En esta condición, la variedad 3 presentó una germinación significativamente menor (93%) en comparación con la variedad 2 (96%) ($p < 0,05$), mientras que la variedad 1 mostró un valor intermedio sin diferencias estadísticamente significativas respecto a las demás.

Sin embargo, la velocidad de germinación, calculada como el tiempo para que la germinación alcance el 50% de la germinación máxima alcanzada (T50), sí presentó diferencias entre tratamientos y variedades. Al analizar el efecto de la temperatura dentro de cada variedad, se observó que a medida que aumentó la temperatura aumentó la velocidad de germinación en todas las variedades (Tabla 1, letras minúsculas). Además, entre los extremos térmicos se identificaron grupos intermedios, significativamente distintos entre sí, lo que refleja una respuesta a la temperatura de incubación progresiva y bien estratificada.

En la variedad 1, la velocidad de germinación se estabilizó a partir de 20 °C, alcanzando su valor máximo a 30 °C con tan solo 16.00h para alcanzar el 50% de la germinación. Esta condición fue significativamente más rápida que todas las demás ($p < 0.001$ en todas las comparaciones, excepto con 20 °C y 30/20 °C, donde $p < 0.01$). Las temperaturas de 20 °C, 25 °C y 30/20 °C conformaron un grupo homogéneo sin diferencias significativas entre ellas. Por el contrario, la temperatura de 5 °C presentó el valor de T50 más alto (69.01h), indicando una germinación mucho más lenta, y fue significativamente distinta del resto de temperaturas ($p < 0.001$ en todas las combinaciones).

En la variedad 2, la velocidad de germinación aumentó de forma escalonada con la temperatura, alcanzando su valor óptimo a 30 °C. Esta temperatura presentó el T50 más bajo del conjunto (17.63h) y fue significativamente diferente al del resto de los

tratamientos ($p < 0.001$ en todas las comparaciones). Por el contrario, la temperatura de 5 °C mostró el valor de T50 más alto (66.15h), indicando la germinación más lenta. Esta condición también fue significativamente diferente a todas las demás ($p < 0.001$ en todas las combinaciones).

En la variedad 3, la velocidad de germinación también mostró un patrón escalonado, con un aumento progresivo a medida que se incrementaba la temperatura. La velocidad más alta se registró a 30°C (18.41h). La condición de 5 °C presentó el valor de T50 más alto (62.68h), siendo significativamente diferente a todas las demás temperaturas ($p < 0.001$ en todos los casos). Por otro lado, las temperaturas de 10 °C, 15 °C y 20 °C mostraron valores intermedios de T50, diferenciándose significativamente tanto de 5 °C como de las temperaturas óptimas.

Cuando se estudiaron las diferencias entre variedades se observó que a las temperaturas máxima y mínimas estudiadas (5 °C y 30 °C), no se detectaron diferencias significativas. A temperaturas entre 10 ºC y 30/20 °C, la variedad 1 exhibió una germinación significativamente más rápida, mientras que la variedad 2 fue la más lenta en todas las condiciones. La variedad 3 mostró un comportamiento intermedio a 10 ºC y 15 °C, alcanzando su máxima velocidad de germinación a 20 ºC y 25 °C, y reduciéndola nuevamente a 30/20 °C.

Tabla 1. Parámetros de germinación de tres variedades de la especie Camelina sativa incubadas en distintas temperaturas; 5ºC, 10ºC, 15ºC, 20ºC, 25ºC, 30/20ºC y 30ºC. Cada dato representa la media de cuatro réplicas de germinación ± error estándar. Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad, y letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento.

	Condiciones de germinación	Germinación Final (%)	Germinación Normal (%)	T50 (horas)
Variedad 1	5ºC	100 ± 0 $^{a\,A}$	95 ± 2	69.01 ± 2.98 $^{a\,A}$
	10ºC	100 ± 0 $^{a\,A}$	98 ± 2	42.19 ± 1.67 $^{b\,A}$
	15ºC	98 ± 1 $^{a\,A}$	90 ± 2	26.23 ± 1.14 $^{c\,A}$
	20ºC	98 ± 3 $^{a\,A}$	89 ± 2	20.94 ± 0.88 $^{d\,A}$
	25ºC	100 ± 0 $^{a\,A}$	91 ± 4	18.89 ± 0.94 $^{d\,A}$
	30/20ºC	97 ± 3 $^{a\,A}$	91 ± 3	19.70 ± 0.85 $^{d\,A}$
	30ºC	98 ± 1 $^{a\,AB}$	93 ± 4	16.00 ± 0.87 $^{e\,A}$
Variedad 2	5ºC	98 ± 3 $^{a\,A}$	94 ± 4	66.15 ± 2.90 $^{a\,A}$
	10ºC	96 ± 2 $^{a\,A}$	90 ± 3	35.47 ± 1.60 $^{b\,B}$
	15ºC	99 ± 1 $^{a\,A}$	90 ± 5	29.95 ± 1.20 $^{c\,B}$
	20ºC	95 ± 2 $^{a\,A}$	88 ± 2	26.21 ± 1.06 $^{d\,B}$
	25ºC	98 ± 3 $^{a\,A}$	87 ± 3	23.00 ± 0.91 $^{de\,B}$
	30/20ºC	96 ± 2 $^{a\,A}$	85 ± 2	24.26 ± 0.94 $^{e\,B}$
	30ºC	96 ± 2 $^{a\,A}$	91 ± 4	17.63 ± 0.95 $^{f\,A}$
Variedad 3	5ºC	95 ± 2 $^{a\,A}$	95 ± 2	62.68 ± 2.77 $^{a\,A}$
	10ºC	98 ± 3 $^{a\,A}$	81 ± 4	38.08 ± 1.57 $^{b\,AB}$
	15ºC	95 ± 2 $^{a\,A}$	82 ± 3	28.60 ± 1.21 $^{c\,AB}$
	20ºC	96 ± 3 $^{a\,A}$	85 ± 3	23.32 ± 0.94 $^{d\,A}$
	25ºC	90 ± 5 $^{a\,A}$	72 ± 5	19.74 ± 0.87 $^{df\,A}$
	30/20ºC	84 ± 2 $^{a\,A}$	62 ± 4	22.73 ± 0.97 $^{ef\,B}$
	30ºC	93 ± 7 $^{a\,B}$	76 ± 10	18.41 ± 1.02 $^{e\,A}$

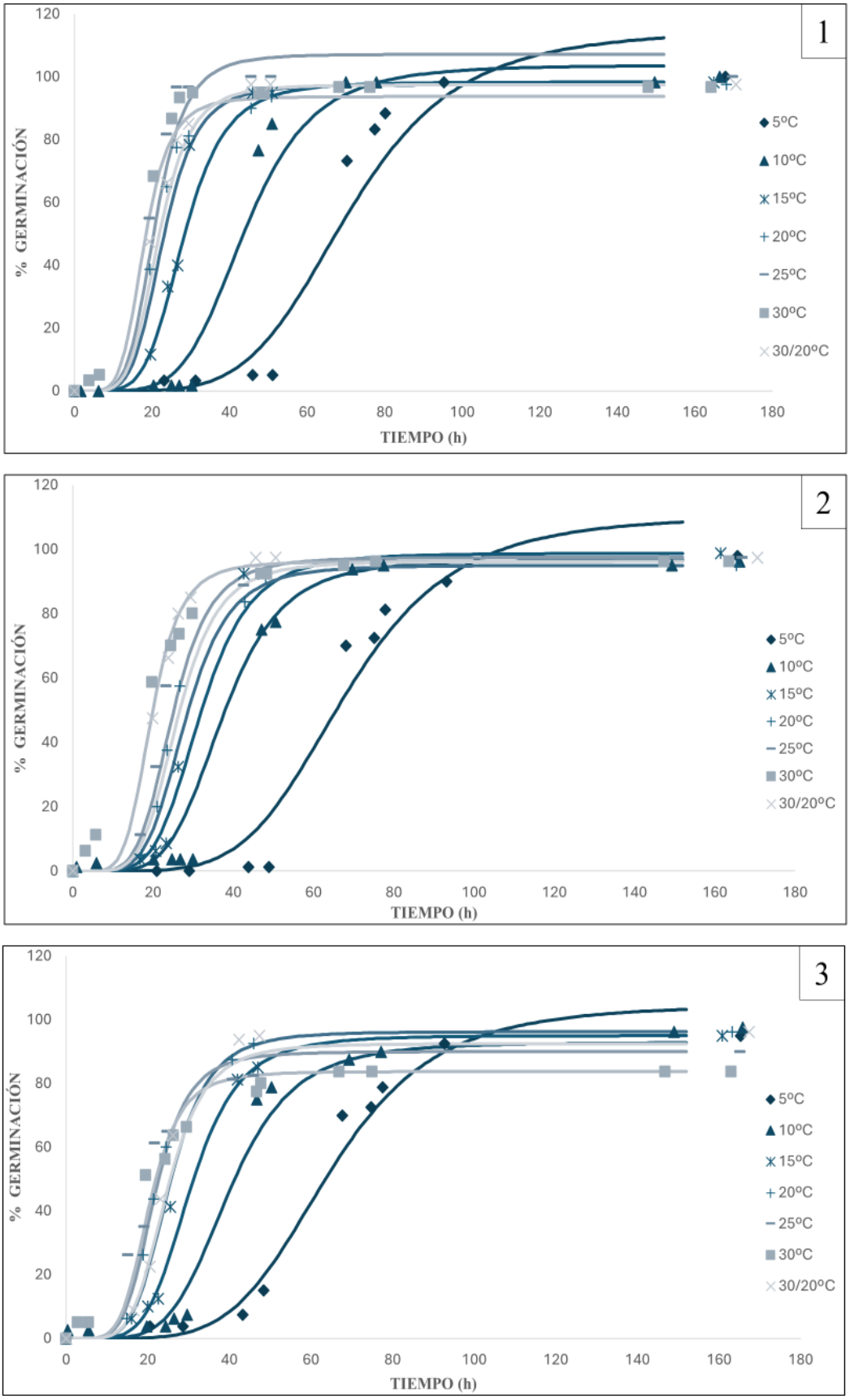


Figura 2. Comparación de las curvas de germinación ajustadas para las siete temperaturas evaluadas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20 y 30 °C) en tres variedades de Camelina sativa L. Cada gráfica corresponde a una variedad distinta (1, 2 y 3). Las líneas representan el ajuste del modelo de regresión logística y los puntos los valores medios experimentales ± error estándar.

4.1.2. Parámetros de raíces y longitud del vástago

Se evaluaron la longitud de radícula y vástago, además del número de raíces secundarias de las semillas germinadas de *C. sativa* de tres variedades tras 7 días de incubación en las temperaturas 5, 10, 15, 20, 25, 30/20 y 30ºC. En la Figura 3 , se presentan los efectos que tuvo la temperatura sobre el crecimiento radicular temprano.

Al analizar el efecto de las temperaturas dentro de cada variedad (Figura 3, letras minúsculas), observamos que, en la variedad 1, la longitud media de radícula mostró un patrón ascendente con forma de campana, alcanzando su valor máximo a 20 °C, con 17.2 mm de longitud. Esta temperatura presentó diferencias significativas respecto a 5 °C ($p <$ 0.001), 10 °C ($p < 0.001$) y 30 °C ($p < 0.05$). Las temperaturas de 15 °C, 25 °C y 30/20 °C mostraron un comportamiento intermedio, sin diferencias con 20 °C, pero significativamente superiores a 5 °C ($p < 0.001$), que registró un valor medio de 3.4 mm. A 30 °C se observó un descenso en el crecimiento. No obstante, el valor siguió siendo significativamente superior a los registrados a 10 °C ($p< 0.05$), y 5 °C ($p< 0.001$). Finalmente, la temperatura de 5 °C presentó el menor desarrollo radicular, siendo significativamente a todas las demás condiciones térmicas ($p< 0.001$ respecto a todas las demás temperaturas).

En la variedad 2, la longitud media de radícula aumentó progresivamente con la temperatura, alcanzando su valor máximo a 20 °C y 25 °C (22.9-23.7 mm). Estas condiciones promovieron un crecimiento significativamente superior al observado a 15 °C ($p < 0.05$), 10 °C y 5 °C ($p < 0.01$). Las temperaturas de 30 °C y 30/20 °C no difirieron significativamente de las condiciones óptimas (20–25 °C), ni tampoco de 15 °C, pero sí mostraron un crecimiento significativamente superior al de 5 °C (5.7 mm). La condición de 15 °C mostró un desarrollo radicular limitado, formando un grupo homogéneo intermedio. Finalmente, las temperaturas de 5 °C y 10 °C presentaron los valores medios más bajos y fueron significativamente inferiores al resto de temperaturas ($p < 0.01$), excepto frente a 15 °C, donde las diferencias fueron menores ($p < 0.05$).

En la variedad 3, la longitud media de radícula aumentó con la temperatura hasta estabilizarse a partir de 20 °C. Las temperaturas más altas estudiadas (20 °C, 25 °C, 30 °C y 30/20 °C) conformaron un grupo homogéneo con los valores más altos (20.3-21.6 mm), sin diferencias significativas entre ellas. La temperatura de 15 °C mostró un desarrollo

intermedio, siendo significativamente superior a 5 °C ($p < 0.01$), pero sin diferencias respecto a 10 °C ni al grupo superior. A su vez, la condición de 10 °C fue significativamente inferior a las temperaturas máximas estudiadas ($p < 0.01$ en todas), aunque no difirió de 15 °C ni de 5 °C. Por último, 5 °C constituyó un grupo aislado con el menor crecimiento radicular (4.1 mm), mostrando diferencias significativas respecto a todas las temperaturas excepto 10 °C.

Al analizar las diferencias entre variedades para cada temperatura (Figura 3, letras mayúsculas), se observó que a 5 °C la variedad 2 presentó el mayor crecimiento radicular (5.7 mm), siendo significativamente superior tanto a la variedad 1 (3.4 mm) como a la variedad 3 (4.1 mm) ($p < 0.01$ en ambos casos). En las temperaturas de 10 °C, 15 °C, 30/20 °C y 30 °C no se detectaron diferencias significativas entre variedades, mostrando un desarrollo similar. En cambio, a 20 °C y 25 °C, la variedad 2 volvió a destacar con los valores más altos, siendo significativamente superior a la variedad 1 ($p < 0.05$), mientras que la variedad 3 mostró un desarrollo intermedio, sin diferencias significativas con el resto.

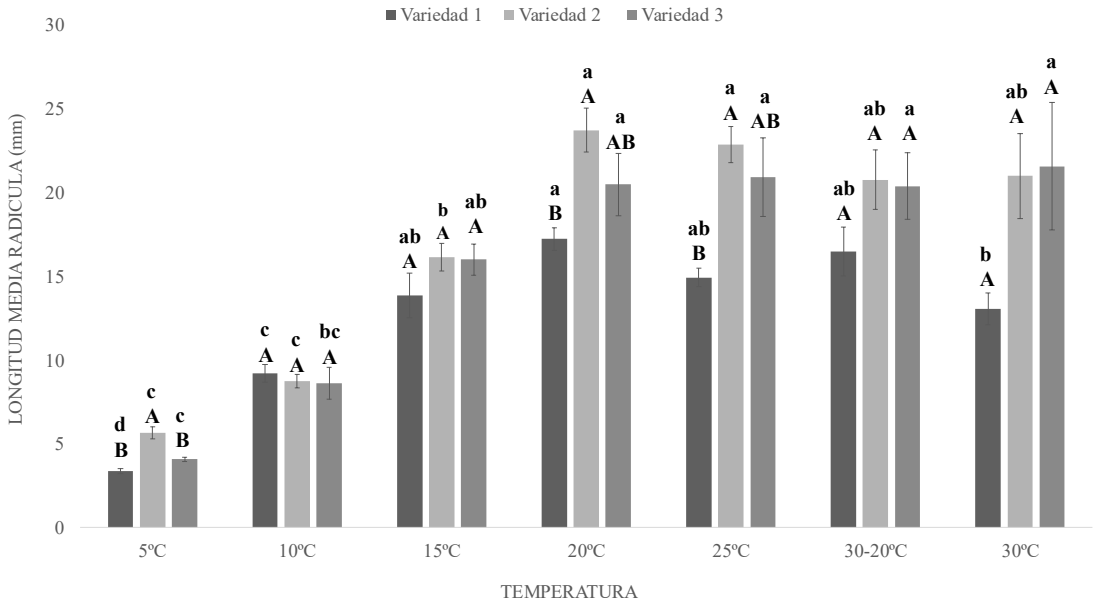


Figura 3. *Longitud de radícula (LR) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20, 30ºC). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.*

En la Figura 4, se presentan los efectos que provocaron las distintas temperaturas sobre el crecimiento temprano del vástago. Al analizar el efecto de los tratamientos dentro de

cada variedad (Figura 4, letras minúsculas), observamos en la variedad 1, que la longitud del vástago aumentó progresivamente con la temperatura entre 5 ºC y 15 ºC, alcanzando una estabilidad a partir de 15 °C, de forma que estas temperaturas (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30/20 °C y 30 °C) conformaron un grupo homogéneo con los valores más altos (6.9 – 7.8 mm). La condición de 10 °C presentó un crecimiento intermedio, significativamente inferior al grupo óptimo ($p < 0.001$ para todas las comparaciones, salvo con 30 °C, donde $p < 0.01$) y superior a la condición de 5 °C ($p < 0.001$). Por su parte, 5 °C registró el menor desarrollo, siendo significativamente inferior a todas las demás temperaturas ($p < 0.001$).

En la variedad 2 se observó un patrón similar al descrito en la variedad 1: la longitud del vástago aumentó con la temperatura y se estabilizó a partir de 15 °C (7.6 – 8.1 mm). La condición de 10 °C mostró un crecimiento intermedio, significativamente inferior al grupo óptimo ($p < 0.001$ en todas las comparaciones) y superior a 5 °C ($p < 0.01$). Esta última presentó el menor desarrollo, diferenciándose significativamente de todas las temperaturas superiores ($p < 0.001$), salvo respecto a 10 °C.

En la variedad 3, la longitud del vástago aumentó con la temperatura, alcanzando su máximo desarrollo a 25 °C (7.6 mm). Esta temperatura fue significativamente superior a 15 °C ($p < 0.05$), 10 °C y 5 °C ($p < 0.001$ en ambos casos). Las condiciones de 20 °C, 30/20 °C y 30 °C mostraron un crecimiento ligeramente inferior al óptimo, sin diferencias significativas respecto a 25 °C ni a 15 °C, conformando así un grupo intermedio. Finalmente, 5 °C y 10 °C registraron los valores más bajos (3 mm y 4.4 mm respectivamente) y se diferenciaron significativamente de todas las demás temperaturas ($p < 0.001$ para todas las comparaciones, salvo con 10ºC-15ºC, donde $p < 0.05$ y 10ºC-20ºC, donde $p < 0.01$).

Al analizar las diferencias entre variedades en la temperatura (Figura 4, letras mayúsculas), se observó que a 5 °C la variedad 1 presentó un crecimiento significativamente inferior al de la variedad 2 ($p < 0.01$) y al de la variedad 3 ($p < 0.05$). A 15 °C, la variedad 3 mostró el menor desarrollo, siendo significativamente inferior a la variedad 2 ($p < 0.01$) y a la variedad 1 ($p < 0.05$). En las restantes temperaturas (10 °C, 20 °C, 25 °C, 30/20 °C y 30 °C), no se detectaron diferencias significativas entre variedades.

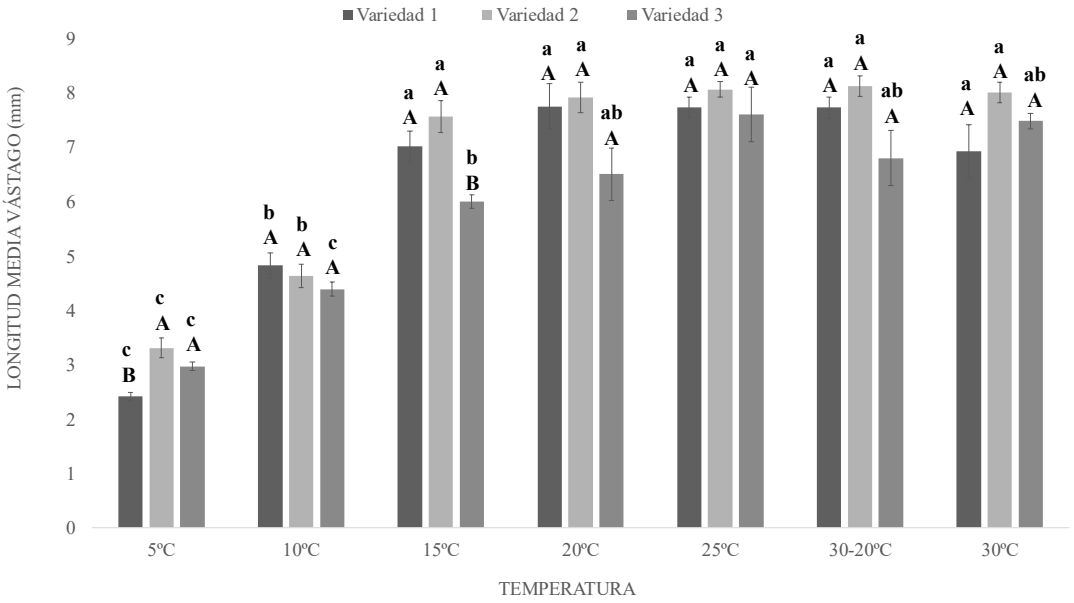


Figura 4. Longitud del vástago (LV) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20, 30ºC). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LV ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.

En la Figura 5, se presentan los efectos que provocaron las distintas temperaturas sobre el número de raíces secundarias desarrolladas. Al analizar el efecto de los tratamientos dentro de cada variedad (Figura 5, letras minúsculas), observamos en la variedad 1, que el número medio de raíces secundarias alcanzó su valor máximo a 25 °C (2.3 raíces), siendo significativamente superior al resto de temperaturas ($p < 0.001$ frente a 5 °C, 10 °C y 15 °C; $p < 0.01$ frente a 20 °C, 30/20 °C y 30 °C). Las condiciones de 20 °C, 30/20 °C y 30 °C mostraron un desarrollo intermedio, conformando un grupo homogéneo significativamente inferior a 25 °C y superior a las temperaturas más bajas ($p < 0.01$ frente a 5 °C, 10 °C y 15 °C). Estas últimas registraron el menor número de raíces secundarias y formaron el grupo con valores nulos, diferenciándose significativamente del resto de temperaturas.

En la variedad 2, las temperaturas de 5 °C, 10 °C y 15 °C tuvieron un desarrollo nulo de las raíces secundarias, conformando un grupo homogéneo sin diferencias significativas entre ellas, pero sí con el resto de las temperaturas; 20ºC ($p < 0.01$), 25ºC ($p < 0.001$), 30/20ºC ($p < 0.001$) y 30ºC ($p < 0.001$). A partir de 20 °C se registró un incremento significativo en el número de raíces, con un pico máximo a 25 °C (2.8 raíces). Esta última condición fue significativamente superior a todas las temperaturas anteriores ($p < 0.001$ en todos los pares salvo con 20ºC, que tuvo un $p < 0.01$). Asimismo, las temperaturas de

20 °C, 30/20 °C y 30 °C presentaron valores intermedios, siendo significativamente inferiores a 25 °C, pero superiores a las temperaturas más bajas.

En la variedad 3, se observó un patrón de respuesta similar al de las variedades anteriores. Las temperaturas de 5 °C, 10 °C y 15 °C no promovieron el desarrollo de raíces secundarias, registrándose valores nulos o cercanos a cero (diferentes valores de *p* en función de la combinación). Estas condiciones formaron un grupo homogéneo significativamente inferior al resto de tratamientos. A partir de 20 °C se evidenció un aumento notable en el número medio de raíces secundarias, con un valor máximo a 25 °C (4.2 raíces). Esta temperatura fue significativamente superior a las condiciones de 30/20 °C y 30 °C ($p < 0.05$), las cuales mostraron un rendimiento intermedio, con una reducción significativa respecto al óptimo.

Al analizar diferencias entre variedades para cada temperatura (Figura 5, letras mayúsculas), se observó que, en las temperaturas de 5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C, 30/20 °C y 30 °C no se detectaron diferencias significativas entre variedades. En cambio, a 20 °C, la variedad 3, con un valor medio de 3 raíces secundarias, presentó un número medio de raíces secundarias significativamente superior al de las variedades 1 y 2 (1.3-1.4 raíces) ($p < 0.05$), conformando así un grupo independiente con mayor desarrollo radicular lateral bajo esta condición.

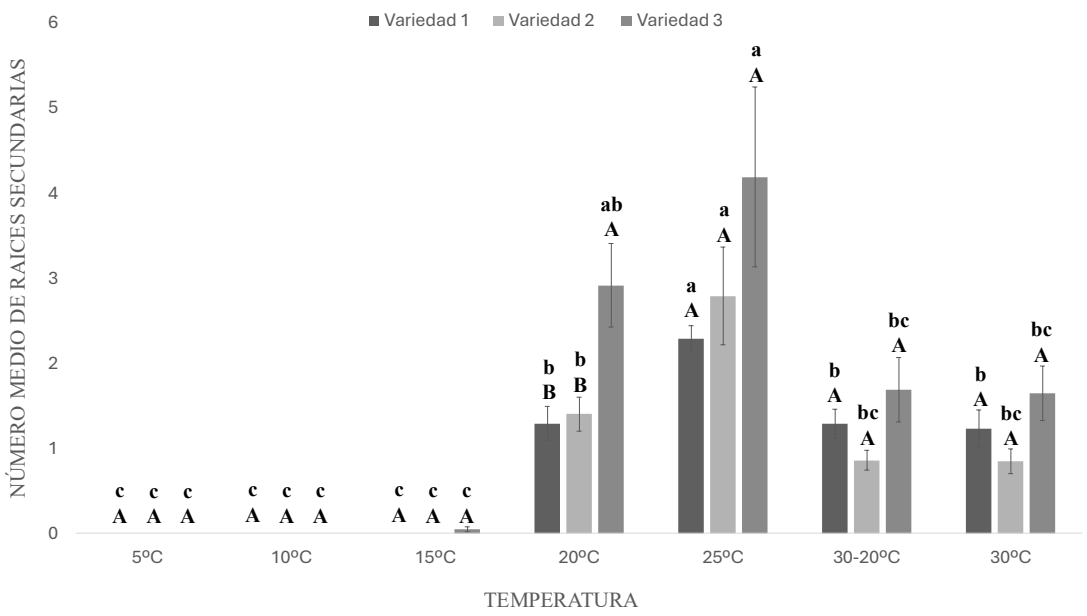


Figura 5. Número de raíces secundarias (NR) por cada plántula de C. sativa germinada en diferentes temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30/20, 30ºC). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de NR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.

4.2. Efecto de la luz

4.2.1. Parámetros de germinación

El presente ensayo evaluó el efecto de distintas condiciones de luz sobre la germinación de semillas comerciales de *C. sativa*, en tres variedades. Se establecieron tres tratamientos lumínicos: exposición completa de toda la plántula a la luz durante un fotoperiodo de 16/8 h, exposición parcial a la luz de la plántula (incidencia de la luz sobre la parte aérea y oscuridad en la zona radicular) (MO), y exposición completa de toda la plántula a la oscuridad (O).

Este enfoque permitió determinar la sensibilidad de las semillas frente al estimulo lumínico, evaluando si existen diferencias significativas entre tratamientos y/o variedades. Posteriormente, estas conclusiones podrán orientar, en un efecto práctico el modo de siembra.

A continuación, se presentan los resultados de germinación obtenidos para las tres variedades de *C. sativa* bajo diferentes condiciones de luz. En la Tabla 2 se recogen los valores medios del porcentaje de germinación final, el porcentaje de germinación normal (=porcentaje germinación final – porcentaje anormales) y el T50 (tiempo que tardan las

semillas en alcanzar el 50% de la germinación máxima. En la Figura 6 se muestra gráficamente la evolución de la germinación normal en función de la temperatura.

En relación con el porcentaje de germinación final, no se identificaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos, ni entre variedades, siendo en todos los casos la germinación final alta.

No obstante, la velocidad de germinación, T50, sí presentó diferencias significativas entre los tratamientos para cada variedad. En la variedad 1, la condición completa de la plántula a luz (16.82h) presentó un desarrollo significativamente más lento que la luz parcial ($p < 0.05$) y la oscuridad ($p< 0.05$), mientras que estas dos últimas mostraron un comportamiento similar (13.5h y 13.8h respectivamente), sin diferencias significativas. En la variedad 2, la germinación fue significativamente más rápida bajo oscuridad total (15.42h), en comparación con la oscuridad ($p < 0.001$). La luz parcial presentó un comportamiento intermedio, sin diferencias significativas respecto al resto de condiciones. En la variedad 3, la velocidad de germinación fue similar en todas las condiciones lumínicas, sin encontrarse diferencias significativas.

Al analizar diferencias entre variedades dentro de cada tratamiento (Figura 6, letras mayúsculas), observamos que, en todas las condiciones la variedad 1, presentó una velocidad de germinación significativamente superior a la variedad 2 y a la variedad 3. En la condición de oscuridad, las variedades 1 y 2 formaron un único grupo homogéneo, sin diferencias significativas entre ellas.

Tabla 2. Parámetros de germinación de tres variedades de la especie Camelina sativa incubadas en distintas condiciones; luz completa, luz parcial en la parte aérea (MO) y oscuridad completa (O), con 16/8 h de fotoperiodo. Cada dato representa la media de cuatro réplicas de germinación ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes en una fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.

Abreviaturas: MO, luz parcial en la parte aérea; O, oscuridad total.

	Condiciones de germinación	Germinación Final (%)	Germinación Normal (%)	T50 (horas)
Variedad 1	L	$100 \pm 0^{\ a\ A}$	91 ± 4	$16.82 \pm 0.91^{\ b\ A}$
	MO	$97 \pm 2^{\ a\ A}$	89 ± 3	$13.78 \pm 1.10^{\ a\ A}$
	O	$100 \pm 0^{\ a\ A}$	90 ± 3	$13.47 \pm 0.97^{\ a\ A}$
Variedad 2	L	$98 \pm 3^{\ a\ A}$	87 ± 3	$22.77 \pm 1.34^{\ b\ B}$
	MO	$98 \pm 2^{\ a\ A}$	90 ± 5	$18.25 \pm 1.59^{\ ab\ B}$

	O	98 ± 3 [a A]	89 ± 3	15.42 ± 1.10 [a A]
Variedad 3	L	96 ± 2 [a A]	85 ± 3	24.17 ± 1.21 [a B]
	MO	94 ± 4 [a A]	75 ± 5	22.17 ± 1.43 [a B]
	O	98 ± 3 [a A]	86 ± 2	21.55 ± 1.20 [a B]

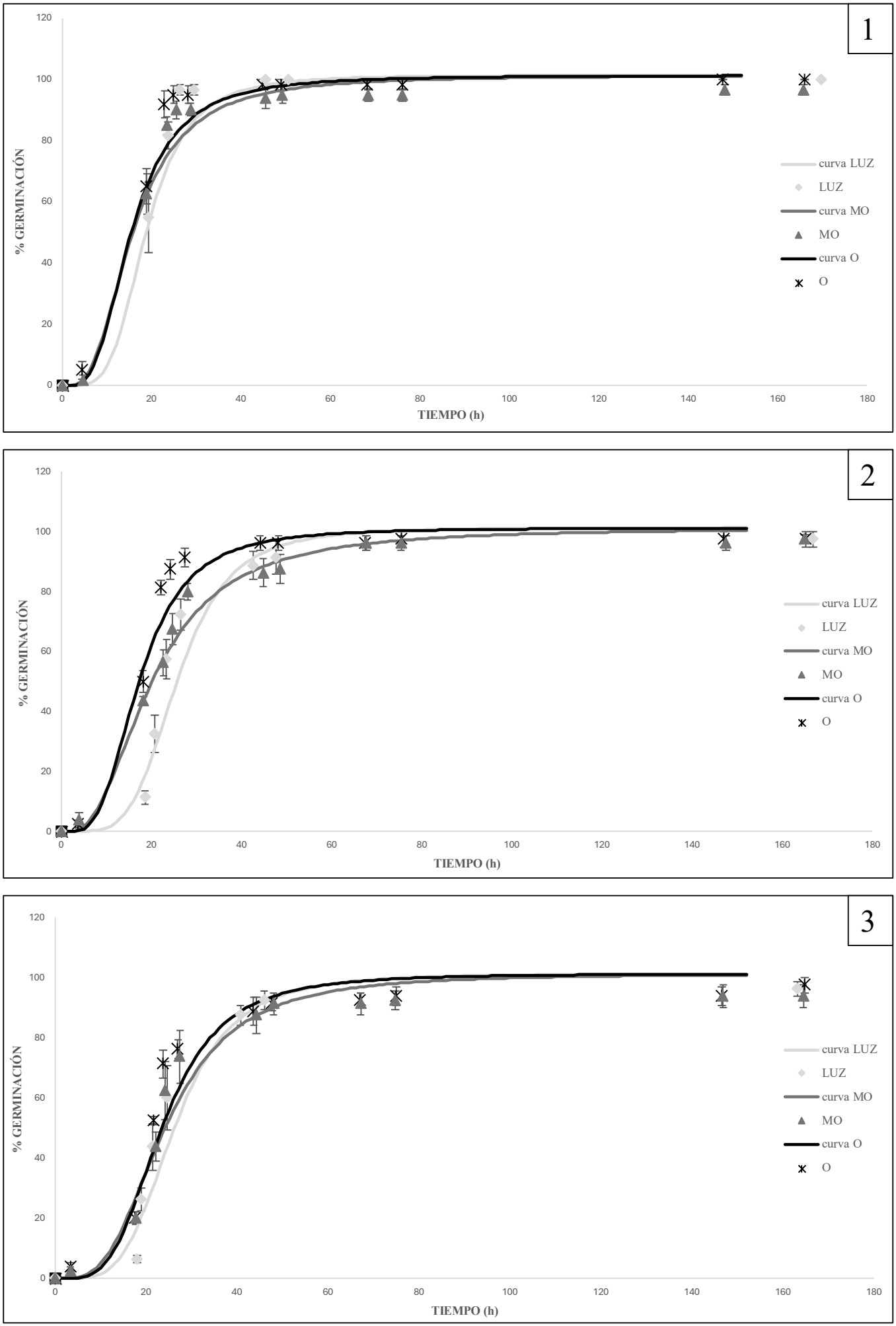


Figura 6. Curvas de germinación de semillas de Camelina sativa L. de las tres variedades, incubadas en diferentes condiciones lumínicas (exposición completa a la luz, exposición parcial a la luz (MO), y oscuridad absoluta (O)). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones ± error estándar. Las curvas corresponden al ajuste del modelo de regresión logística y se utilizaronpara estimar parámetros de velocidad de germinación.

4.2.2. Parámetros de raíces y longitud del vástago

En esta sección se evaluaron tres variables tras siete días de incubación: la longitud de radícula (LR), la longitud de vástago (LV) y el número de raíces secundarias (NR), bajo tres condiciones lumínicas distintas: exposición completa de la plántula a la luz (L), exposición completa a la oscuridad (O) y exposición lumínica parcial (aplicada solo a la parte aérea) (MO).

En la Figura 7, se presentan los efectos que provocaron las distintas condiciones de luz sobre el crecimiento radicular temprano. Al analizar el efecto de los tratamientos dentro de cada variedad (Figura 7, letras minúsculas), no se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

Al estudiar las diferencias entre variedades dentro de cada tratamiento (Figura 7, letras mayúsculas), se observó que en la condición de luz total hubo diferencias significativas entre las variedades. La variedad 2 presentó la mayor longitud de radícula (22.9 mm), siendo significativamente superior a la variedad 1, con un crecimiento radicular de 14.9 mm ($p < 0.05$), mientras que la variedad 3 mostró un valor intermedio, sin diferencias significativas respecto a las otras dos.

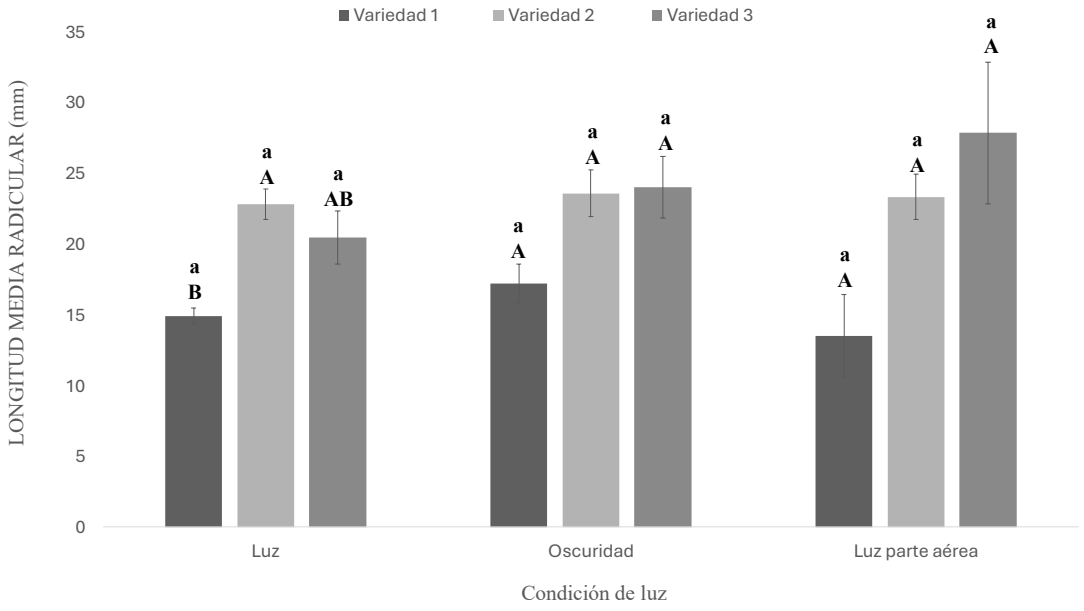


Figura 7. Longitud de radícula (LR) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: O, oscuridad; MO, luz parte aérea

En la Figura 8 se presentan los efectos que provocaron las distintas condiciones de luz sobre el crecimiento del vástago. Al analizar el efecto de los tratamientos en la variedad (Figura 8, letras minúsculas), observamos que la condición de oscuridad promovió el mayor crecimiento en las tres variedades, resultado consistente con el proceso morfogénico de etoliamente, caracterizado por elongación acelerada del hipocótilo en ausencia de luz.

Tanto en la variedad 1 como la variedad 3, las condiciones de luz total y luz parcial ($p <$ 0.001 para ambos casos y en las dos variedades), no difirieron entre sí. En la variedad 2, se observó un patrón escalonado, donde la condición de oscuridad presentó el mayor desarrollo (13.8 mm), siendo significativamente distinto al resto de condiciones ($p < 0.01$ respecto a MO y $p < 0.001$ respecto a Luz total), seguida por la condición de luz parcial, que fue significativamente distinto a la condición de la luz total ($p <0.01$), que presentó el rendimiento más bajo (8.1 mm).

Al estudiar el efecto de la variedad dentro de cada tratamiento (Figura 8, letras mayúsculas), se observaron diferencias significativas en los tratamientos de luz total y luz parcial. En ambos casos, la variedad 2 presentó la mayor longitud de vástago, siendo significativamente distinta a la variedad 3 ($p < 0.05$ en ambas condiciones), mientras que la variedad 1 mostró un comportamiento intermedio, sin diferencias respecto a las otras dos. En el tratamiento de oscuridad, no se observaron diferencias significativas entre variedades.

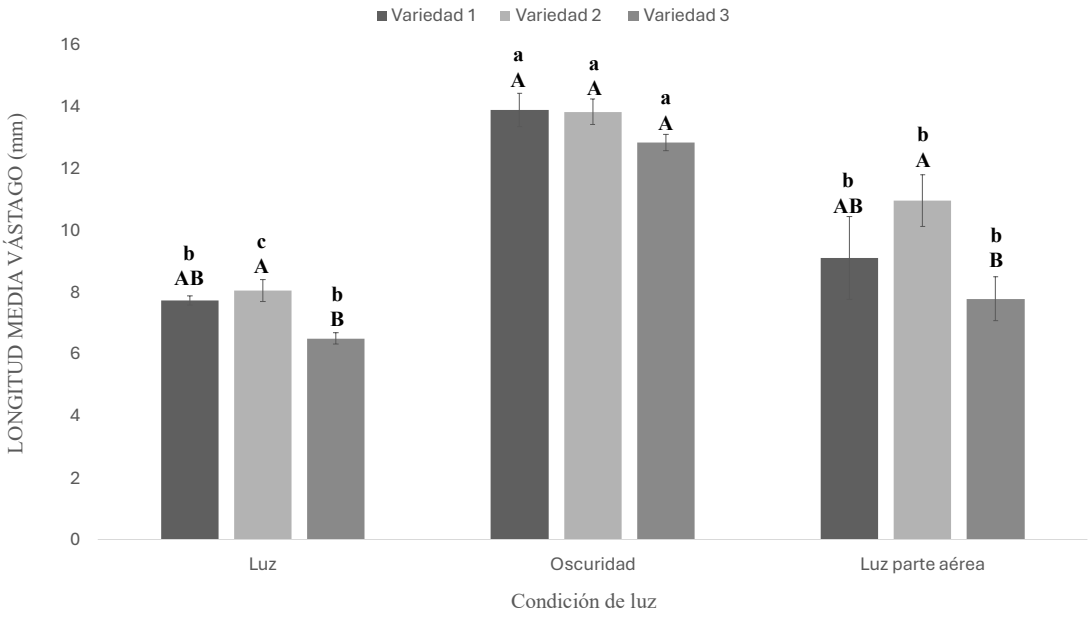


Figura 8. Longitud del vástago (LV) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LV ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: O, oscuridad; MO, luz parte aérea

En la Figura 9, se presentan los efectos que provocaron las distintas condiciones de luz sobre el número de raíces secundarias. Al estudiar el efecto del tratamiento dentro de la variedad, observamos que, en todas las variedades, la condición de luz total promovió el mayor número de raíces secundarias, siendo significativamente superior al resto de condiciones (2.3-2.9 raíces). En la variedad 1 además la condición de luz parcial mostró un valor intermedio, significativamente superior a la oscuridad ($p < 0.05$), que registró el menor número de raíces secundarias (0.8 raíces). En la variedad 2 y en la variedad 3, las condiciones de luz parcial y oscuridad mostraron comportamientos similares, sin diferencias significativas entre ellas.

En la condición de luz total no se encontraron diferencias significativas entre variedades. En la condición de luz parcial, se identificaron dos grupos homogéneos. Las variedades 2 y 3 presentaron una media similar, sin mostrar diferencias significativas entre ellas. La variedad 1 presentó una media significativamente superior, diferenciándose tanto de la variedad 2 ($p < 0.05$) como de la variedad 3 ($p < 0.01$). En la condición de oscuridad, la variedad 2 presentó el número de raíces más alto (0.9 raíces), siendo significativamente distinto a la variedad 3, que registró una media de 0.3 raíces secundarias ($p< 0.05$). La variedad

1, tuvo un comportamiento intermedio, sin presentar diferencias significativas con ninguna variedad.

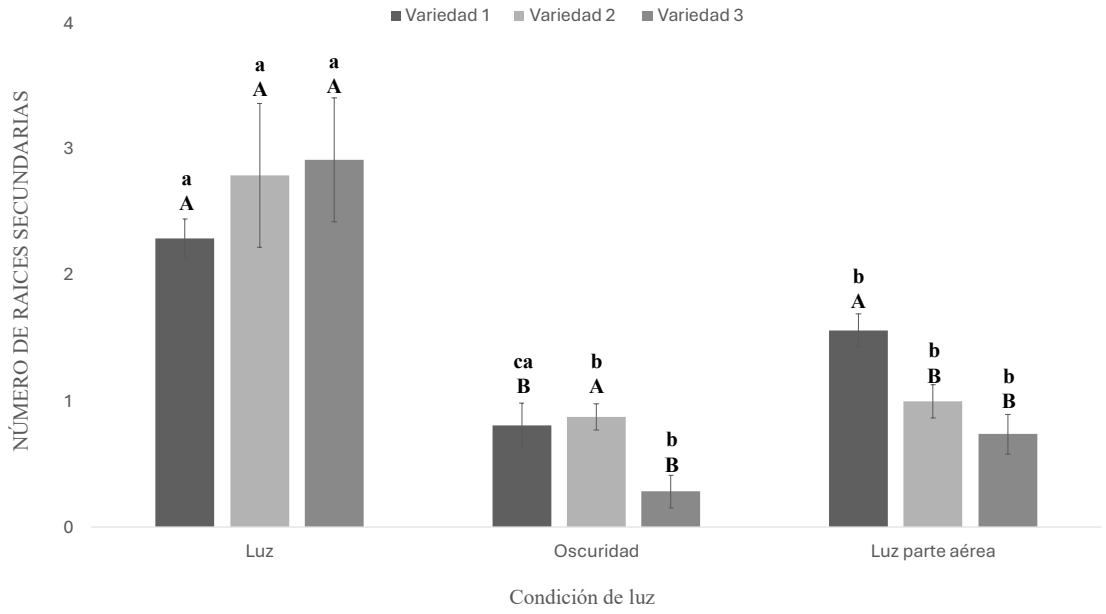


Figura 9. Número de raíces secundarias (NR) por cada plántula de C. sativa germinada en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: O, oscuridad; MO, luz parte aérea

4.2.3. Biomasa

El peso fresco y el peso seco de las semillas germinadas de *C. sativa* se evaluaron al cabo de 7 días de crecimiento en las siguientes condiciones de luz: luz total, luz parcial en la parte aérea, oscuridad total; y tres variedades.

Se observa en la Figura 10, los resultados de los pesos frescos medios.

Al estudiar el efecto del tratamiento dentro de cada variedad (Figura 10, letras minúsculas), se observa que en la variedad 1 el mayor peso fresco medio se registró en la condición de oscuridad (6.8 mg), siendo significativamente superior a la condición de luz ($p < 0.05$), que registro un peso medio de 3.4 mg. La condición de luz parcial mostró un valor intermedio, sin diferencias significativas respecto a los otros tratamientos.

En la variedad 2, las condiciones de oscuridad y luz parcial presentaron valores similares, sin diferencias significativas entre ellas. En cambio, la condición de luz total mostró el

peso fresco medio más bajo, siendo significativamente inferior tanto a la oscuridad ($p < 0.001$) como a la luz parcial ($p < 0.01$).

En la variedad 3 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

Al estudiar las diferencias entre variedades dentro de cada tratamiento (Figura 10, letras mayúsculas), se observa que en todos los casos las tres variedades presentaron respuestas homogéneas, sin encontrarse diferencias significativas entre ellas.

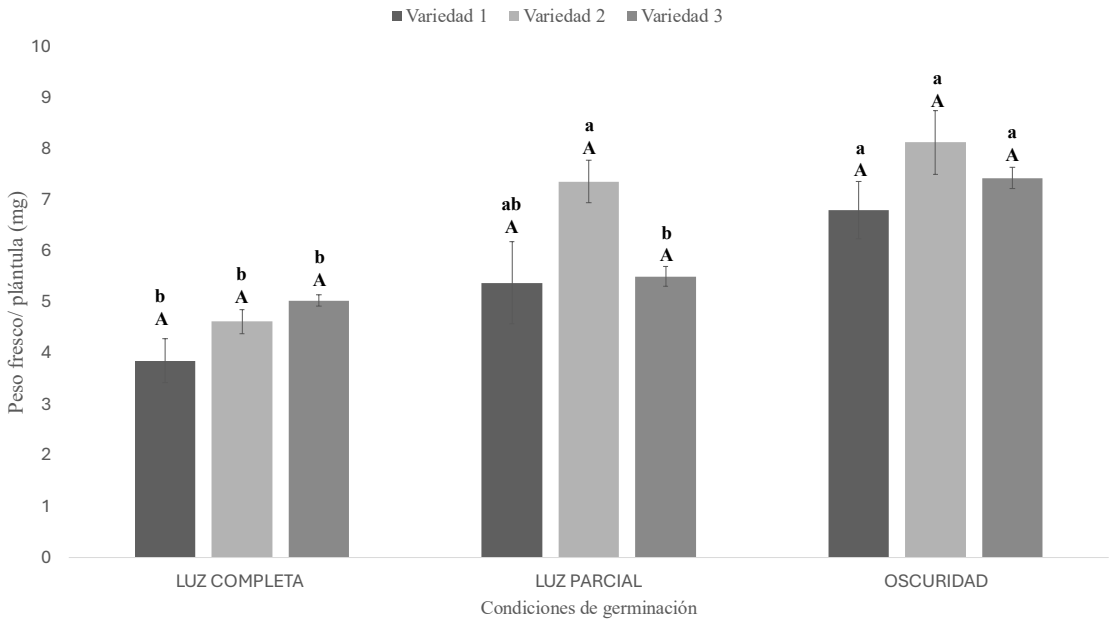


Figura 10. Peso fresco(PF) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de PF ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: O, oscuridad; MO, luz parte aérea

En la Figura 11 , se presentan los efectos que provocaron las distintas condiciones de luz sobre el peso seco.

Al estudiar el efecto de los tratamientos sobre el peso seco dentro de cada variedad (Figura 11, letras minúsculas), se observa que, todas las variedades presentaron valores medios similares bajo las distintas condiciones lumínicas, sin encontrarse diferencias significativas.

Al analizar las diferencias entre variedades dentro de cada tratamiento (Figura 11, letras mayúsculas), encontramos diferencias significativas en los tres tratamientos.

Bajo luz total, las variedades 2 y 3 presentaron valores similares sin diferencias significativas entre ellas. La variedad 1, por el contrario, tuvo la media más baja, siendo significativamente distinta a la variedad 2 y a la variedad 3 (ambas $p < 0.01$).

Por otro lado, tanto en la condición de exposición parcial como la condición de oscuridad, la variedad 3 presentó el mayor peso seco medio, diferenciándose significativamente de la variedad 1 ($p < 0.05$), mientras que la variedad 2 mostró un comportamiento intermedio, sin diferencias respecto a las otras dos.

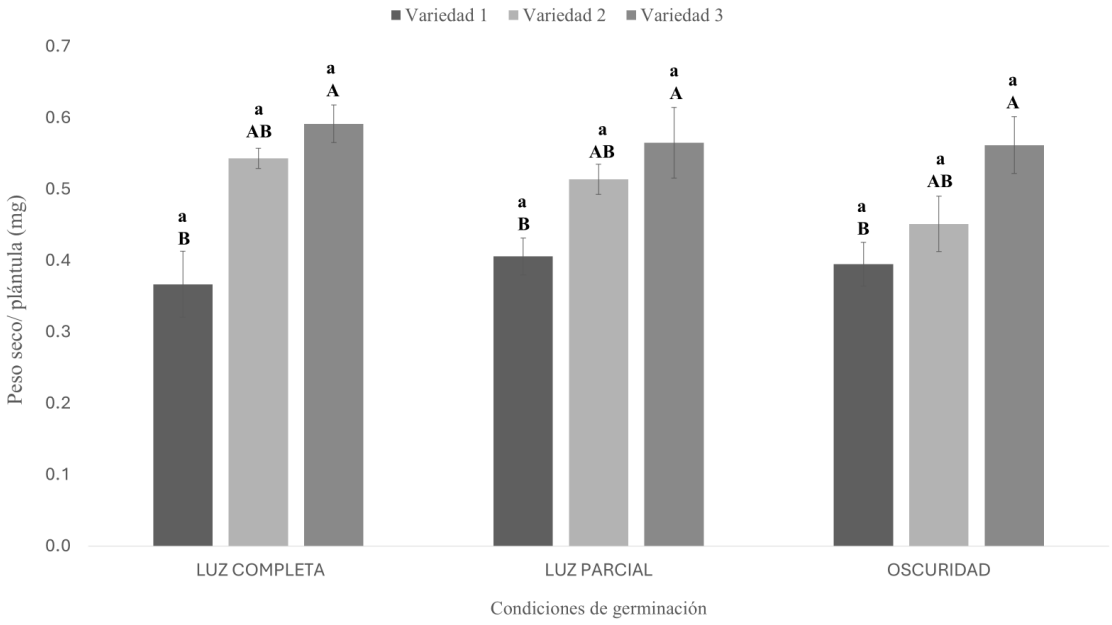


Figura 11. Peso seco (PS) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones de luz (Luz total, luz parcial (MO) y oscuridad (O)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: O, oscuridad; MO, luz parte aérea

4.3. Efecto del estrés hídrico y salino

4.3.1. Parámetros de germinación

El presente ensayo evaluó el efecto del estrés hídrico u osmótico (EO) y del estrés salino (ES) sobre la germinación de semillas de *C. sativa*, en tres variedades. Este enfoque permitió determinar la sensibilidad de las semillas frente a condiciones habituales de estrés en el campo como pueden ser el estrés hídrico, evaluando si existen diferencias significativas entre tratamientos y/o variedades. Posteriormente, estas conclusiones podrán orientar el manejo hídrico del cultivo.

A continuación, se presentan los resultados de germinación obtenidos para las tres variedades de *C. sativa* bajo los efectos de los dos estreses evaluados. En la Tabla 3 se recogen los valores medios del porcentaje de germinación final, el porcentaje de germinación normal (=porcentaje germinación final – porcentaje anormales) y el T50 (tiempo que tardan las semillas en alcanzar el 50% de la germinación máxima. En la Figura 12 se muestra gráficamente la evolución de la germinación en distintos tratamientos.

En relación con el porcentaje de germinación final, no se identificaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos, ni variedades, siendo en todos los casos la germinación final alta.

No obstante, la velocidad de germinación, T50, presenta diferencias significativas entre los tratamientos para cada variedad (Tabla 3, letras minúsculas). Se observa, en las tres variedades, que las semillas en la condición control han logrado la germinación más acelerada. Las semillas con estrés salino han experimentado una germinación intermedia más lenta, mientras que las semillas con estrés hídrico han sido las que más han retrasado su germinación, con un T50 que casi duplica el T50 control (36.73 vs 19.96 en la variedad 1).

Por otro lado, no se han mostrado diferencias significativas entre variedades ni en las variables de germinación ni de velocidad en los tratamientos de estreses (Tabla 3, letras mayúsculas).

Tabla 3. Parámetros de germinación de tres variedades de la especie Camelina sativa incubadas en distintas condiciones; control, estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO), con 16/8 h de fotoperiodo. Cada dato representa la media de cuatro réplicas de germinación ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes en una fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad (test de Tukey, α = 0,05).

Abreviaturas: EO, estrés hídrico; ES, estrés salino.

	Condiciones de germinación	Germinación Final (%)	Germinación Normal (%)	T50 (horas)
Variedad 1	CONTROL	100 ± 0 $^{a\,A}$	91 ± 4	19.96 ± 1.09 $^{c\,A}$
	ES	97 ± 2 $^{a\,A}$	88 ± 3	26.58 ± 1.27 $^{b\,A}$
	EO	93 ± 2 $^{a\,A}$	92 ± 3	36.43 ± 1.62 $^{a\,A}$

	CONTROL	98 ± 3 $^{a\,A}$	87 ± 3	22.78 ± 1.01 $^{c\,B}$
Variedad 2	ES	88 ± 6 $^{a\,A}$	85 ± 9	29.89 ± 1.44 $^{b\,A}$
	EO	90 ± 8 $^{a\,A}$	88 ± 8	36.35 ± 1.60 $^{a\,A}$
	CONTROL	96 ± 2 $^{a\,A}$	85 ± 3	22.90 ± 1.02 $^{c\,B}$
Variedad 3	ES	90 ± 0 $^{a\,A}$	87 ± 2	30.19 ± 1.46 $^{b\,A}$
	EO	96 ± 2 $^{a\,A}$	95 ± 2	40.45 ± 1.91 $^{a\,A}$

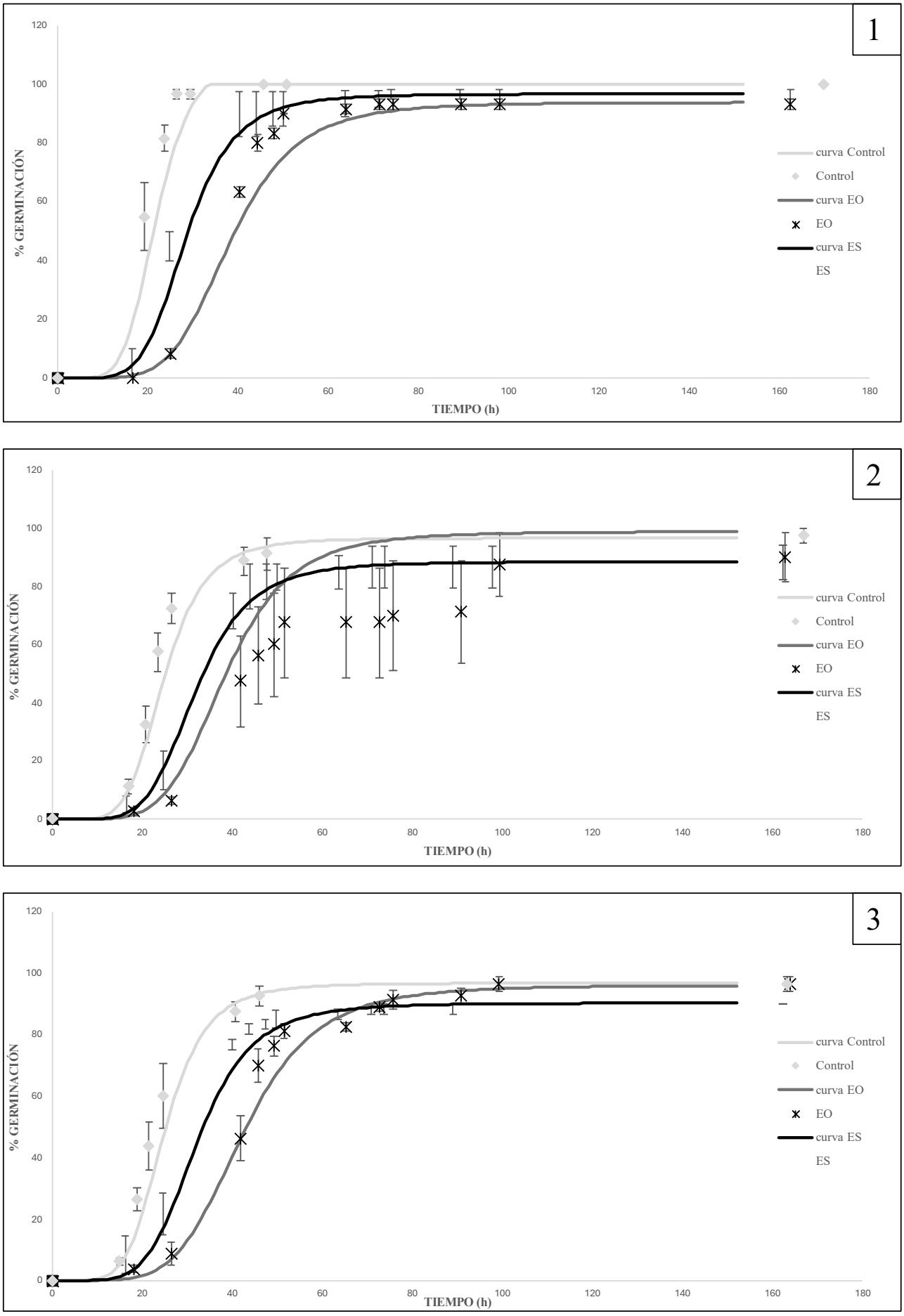


Figura 12. Curvas de germinación de semillas de Camelina sativa L. de las tres variedades, incubadas en diferentes condiciones lumínicas (exposición completa a la luz, exposición parcial a la luz (MO), y oscuridad absoluta (O)). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones ± error estándar. Las curvas corresponden al ajuste del modelo de regresión logística y se utilizaron para estimar parámetros de velocidad de germinación.

4.3.2. Parámetros de raíces y longitud del vástago

Se evaluaron en esta sección la longitud de radícula (LR) y vástago (LV), además del número de raíces secundarias (NR) de las semillas germinadas de *C. sativa* tras 7 días de incubación en las condiciones control, estrés salino y estrés hídrico. En la Figura 13 se presentan los efectos de los tratamientos de estrés sobre el crecimiento radicular temprano.

Al analizar el efecto de los tratamientos sobre la longitud media de radícula dentro de cada variedad (Figura 13, letras minúsculas), se observa que la variedad 1 no presenta diferencias significativas entre condiciones. En la variedad 2 se detectaron diferencias significativas entre todos los tratamientos; el tratamiento control presentó las longitudes más elevadas (22.9 mm), mostrando diferencias significativas tanto frente al tratamiento con estrés osmótico, que tuvo un valor medio de 13.6 mm ($p < 0.05$), como frente al tratamiento con estrés salino ($p < 0.001$), con 2.5 mm de longitud. El tratamiento EO mostró una reducción intermedia en el crecimiento, mientras que el tratamiento ES fue el más reducido, con diferencias significativas también respecto a EO ($p < 0.01$). En la variedad 3, se observa que el tratamiento control presento el crecimiento medio más elevado (20.5 mm), seguido por el tratamiento EO, sin diferencias significativas entre ambos. Mientras, la condición ES mostró un desarrollo significativamente menor a ambos ($p < 0.001$ respecto al control y $p < 0.01$ respecto al EO).

En cuanto a las diferencias entre las variedades dentro de un tratamiento (Figura 13, letras mayúsculas), se observa que los tratamientos bajo condiciones de estrés; tanto en el estrés hídrico (EO) como en el estrés salino (ES), no se encontraron diferencias significativas entre variedades.

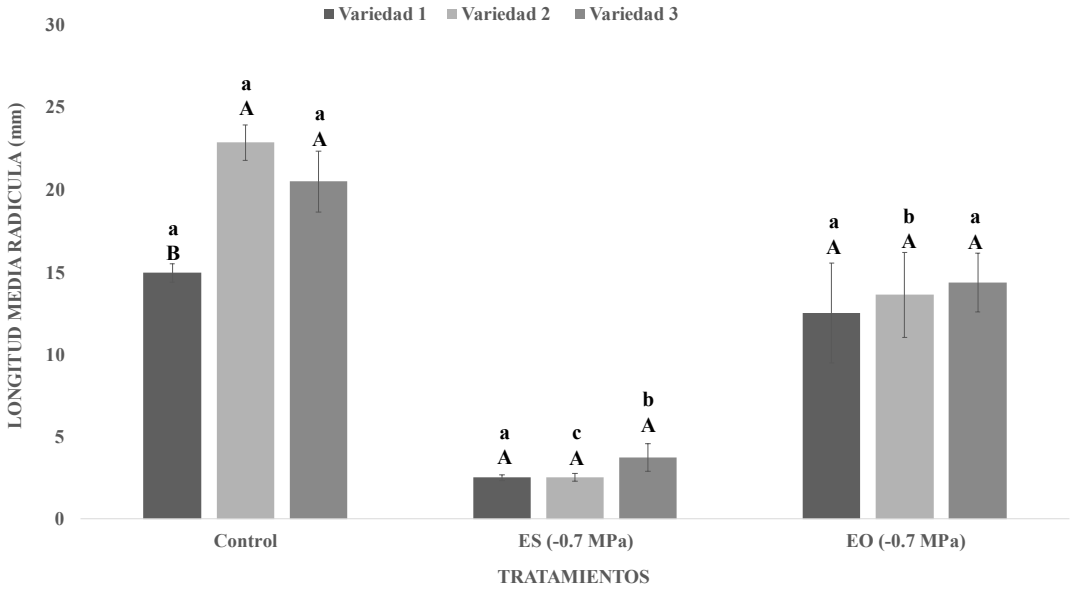


Figura 13. Longitud de radícula (LR) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. Abreviaturas: EO, estrés hídrico; ES, estrés salino

Respecto a la longitud media del vástago, encontramos que en la variedad 1 se detectaron diferencias significativas entre todos los tratamientos ($p < 0.001$), como indican las letras minúsculas. El mayor crecimiento se observó en la condición Control, seguido por el tratamiento con estrés salino (ES), mientras que la menor longitud se registró bajo estrés osmótico (EO). En la variedad 2, el tratamiento Control registró la mayor longitud media de vástago, con diferencias significativas respecto a los tratamientos EO y ES ($p < 0.001$). Ambos tratamientos bajo estrés compartieron la misma letra minúscula, lo que indica que no presentaron diferencias significativas entre sí, y reflejaron un crecimiento notablemente inferior al de la condición control. En la variedad 3, el mayor crecimiento medio del vástago se observó en la condición Control, que presentó diferencias significativas con el tratamiento EO ($p < 0.05$). Por su parte, el tratamiento ES no mostró diferencias significativas con ninguno de los otros tratamientos, situándose en un grupo intermedio.

En los tratamientos bajo condiciones de estrés, tanto en EO como en ES, no se detectaron diferencias significativas entre variedades (Figura 14, letras mayúsculas).

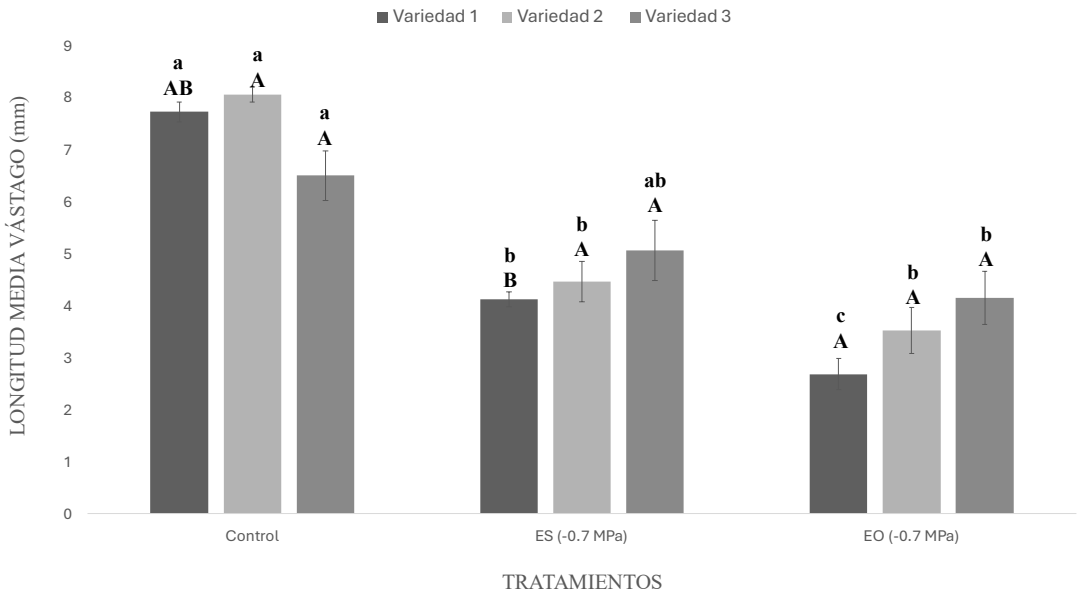


Figura 14. Longitud de vástago (LV) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de LV ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad. Abreviaturas: EO, estrés hídrico; ES, estrés salino.

En cuanto al número de raíces secundarias, se observa en la Figura 15 que, en las tres variedades, el tratamiento control presentó el mayor número de raíces secundarias, con diferencias significativas respecto al tratamiento ES, que mostró una inhibición completa de esta variable. Las diferencias fueron significativas para la variedad 1 y la variedad 2 ($p < 0.05$), y aún más marcadas en la variedad 3 ($p < 0.01$). El tratamiento EO mostró un desarrollo intermedio, pero no presentó diferencias significativas con ninguno de los otros tratamientos en ninguna de las variedades.

No se observaron diferencias significativas entre variedades en ninguno de los casos, lo que indica una respuesta homogénea entre genotipos bajo todas las condiciones evaluadas.

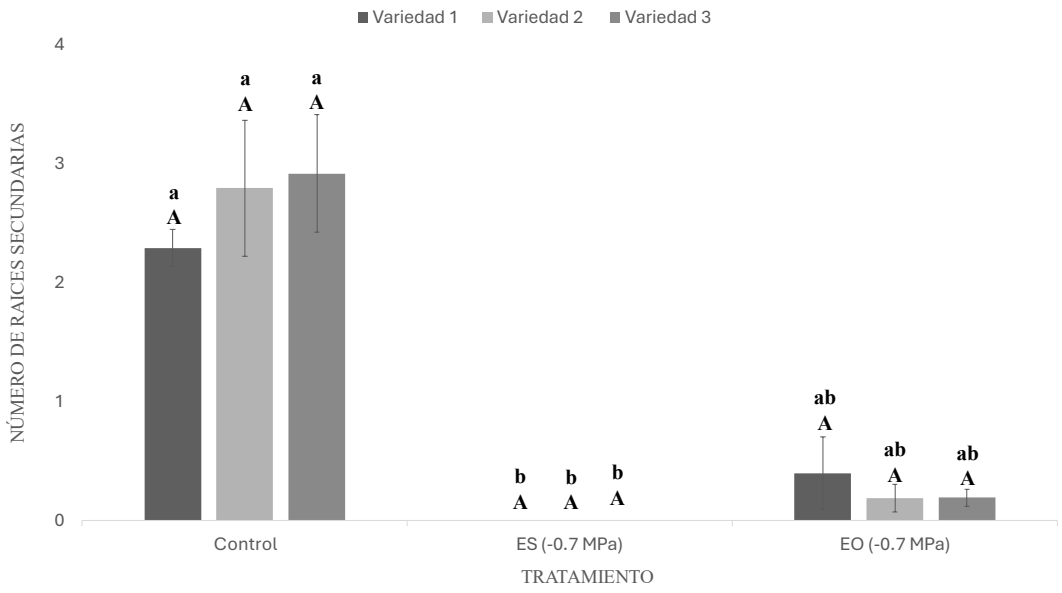


Figura 15. Número de raíces secundarias (NR) por cada plántula de C. sativa germinada en diferentes condiciones estrés: estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de NR ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: EO, estrés hídrico; ES, estrés salino.

4.3.3. Biomasa

El peso fresco y el peso seco de las semillas germinadas de C. sativa se evaluaron al cabo de 7 días de crecimiento en las siguientes condiciones: control, estrés hídrico y estrés salino, estos dos últimos, diseñados para que simulen un potencial negativo de 0.7 MPa; y tres variedades.

Al analizar el efecto de los tratamientos sobre peso fresco dentro de cada variedad (Figura 16, letras minúsculas), se observa que la variedad 1 presentó valores similares en el caso control y el tratamiento de estrés salino, sin mostrar diferencias significativas entre ellos. Por el contrario, el tratamiento de estrés hídrico registró un valor más bajo (1.18 mg), siendo significativamente diferente a ambos ($p < 0.01$ y $p < 0.05$ respectivamente).

En la variedad 2, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, mostrando una respuesta estable del peso fresco ante los distintos tratamientos.

En la variedad 3, el tratamiento EO fue el que registró el menor peso, con diferencias significativas frente al tratamiento ES y Control ($p < 0.01$ y $p < 0.05$ respectivamente).

Al analizar las diferencias entre variedades dentro de cada tratamiento (Figura 16, letras mayúsculas), se observa que en la condición Control y EO no hubo diferencias

significativas entre variedades. En cambio, en el tratamiento ES, la variedad 3 mostró el mayor valor de peso fresco (6.12 mg), mientras que la variedad 1 presentó el valor más bajo, con diferencias significativas respecto a la variedad 2 ($p < 0.05$). La variedad 3 se situó en una posición intermedia, sin diferencias significativas con el resto.

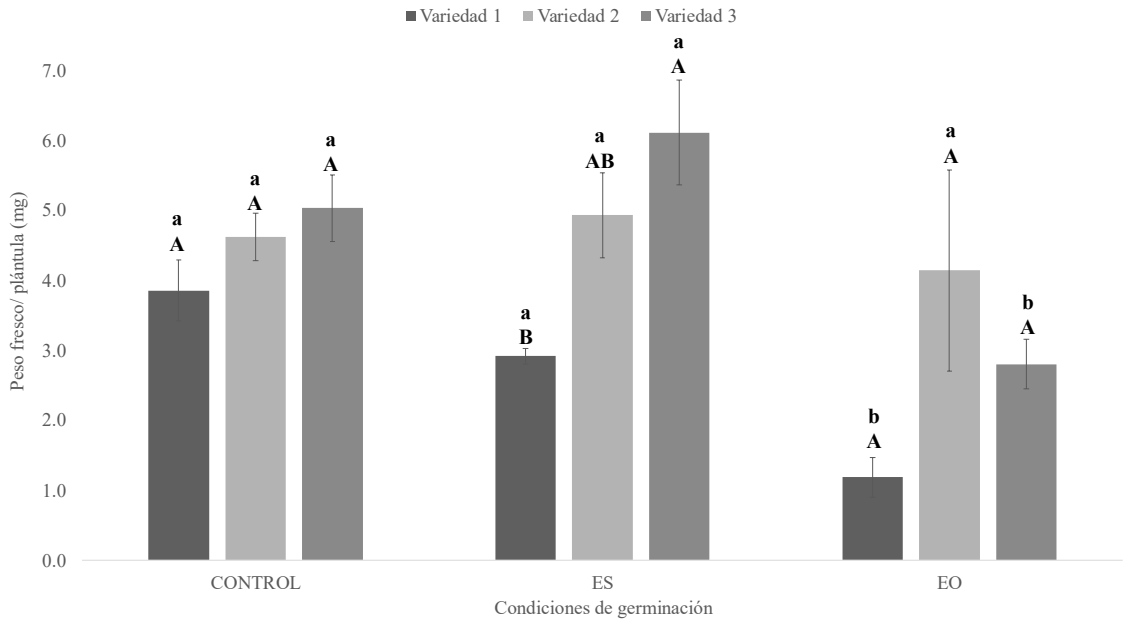


Figura 16. Peso fresco (PF) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de PF ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: EO, estrés hídrico; ES, estrés salino.

La Figura 17, muestra los resultado obtenidos en el ensayo 3 respecto a la variable peso seco.

En las variedades 1 y 2, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. En la variedad 3, se observaron diferencias significativas entre tratamientos; el mayor valor se registró en la condición EO, siendo significativamente superior al tratamiento Control ($p < 0.05$). El tratamiento ES presentó un valor intermedio, sin diferencias significativas con los otros dos.

Al analizar las diferencias entre variedades dentro de cada tratamiento (Figura 17, letras mayúsculas), se observa que en la condición Control, las variedades 2 y 3 presentaron

valores de peso seco significativamente superiores a los de la variedad 1 ($p < 0.01$ en ambos casos).

En la condición ES, la variedad 3 mostró el mayor peso seco, mientras que la variedad 2 se situó en una posición intermedia sin diferencias significativas con el resto. La variedad 1 presentó los valores más bajos, siendo significativamente inferior a la variedad 3 ($p < 0.01$). De forma similar, el tratamiento EO presentó una respuesta escalonada, siendo la variedad 3 la que mayor peso seco presento siendo significativamente distinta a la variedad 1 ($p < 0.01$). La variedad 2 tuvo un comportamiento intermedio, sin presentar diferencias significativas con ninguna variedad.

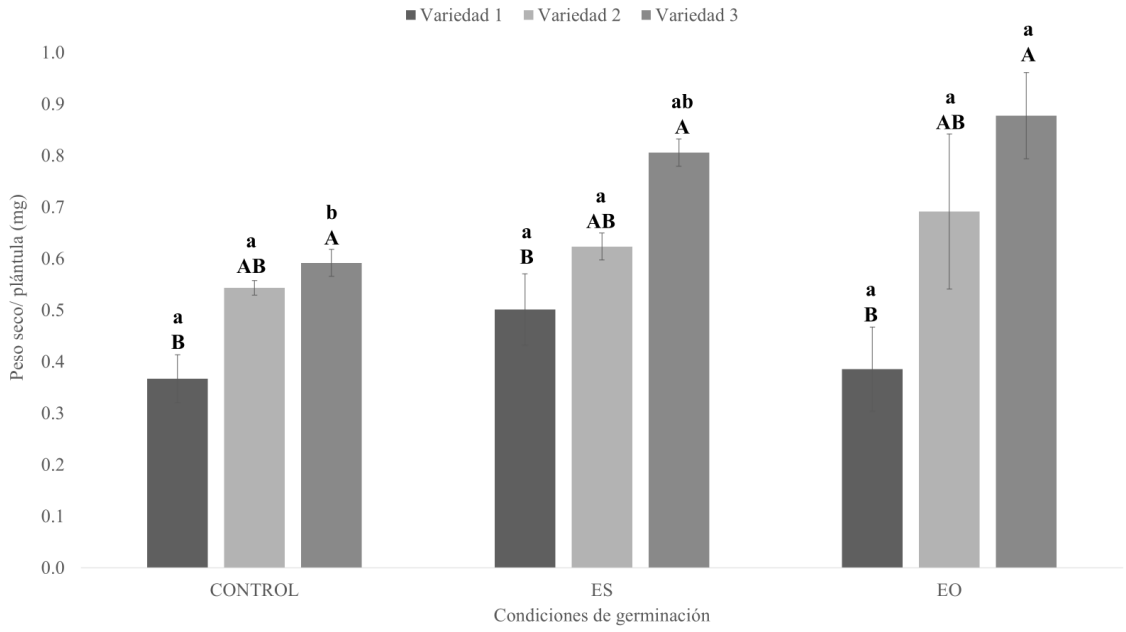


Figura 17. Peso seco (PS) de las plántulas de C. sativa germinadas en diferentes condiciones estrés (estrés salino (ES) y estrés hídrico (EO)). Cada barra representa la media de cuatro réplicas de PS ± error estándar. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre variedades dentro de un tratamiento, y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variedad.
Abreviaturas: EO, estrés hídrico; ES, estrés salino.

V. DISCUSIÓN

5.1. Efecto de la temperatura

Los resultados obtenidos en este ensayo muestran que la germinación final de *C. sativa* fue elevada y homogénea en todas las temperaturas evaluadas y variedades (≥85%), sin identificarse una temperatura óptima para el porcentaje final de germinación. Este comportamiento refleja una notable capacidad de tolerancia de la especie ante un amplio

rango de temperaturas durante la fase de germinación. Sin embargo, sí se observaron diferencias significativas en la velocidad de germinación (T50); en las tres variedades estudiadas, la velocidad de germinación aumentó progresivamente conforme lo hizo la temperatura, siendo 30 °C la condición más favorable en términos de rapidez, y 5 °C la más limitante, con valores de T50 considerablemente más altos, llegando casi a duplicarse. Este fenómeno ha sido previamente descrito por Hosseini Sanehkoori et al. (2021), quienes señalaron que la germinación de *C. sativa* se ve inhibida progresivamente por debajo de 20 °C debido a la reducción en la tasa metabólica y al aumento del requerimiento térmico acumulado (θT). Este último parámetro entendido como la cantidad mínima de calor, expresada en grados-día (°Cd), que una planta debe acumular para completar una fase de su desarrollo y pasar a la siguiente (FAO, 2001). Asimismo, Simon (1976) complementa esta interpretación al atribuir dicha inhibición a una desaceleración de los procesos metabólicos esenciales, como la respiración y la actividad enzimática, los cuales resultan fundamentales para la activación del embrión.

Esta ralentización de los procesos metabólicos a bajas temperaturas no solo afecta al tiempo de emergencia, sino también al desarrollo temprano de las plántulas. En todas las variables analizadas, las temperaturas de 5 °C y 10 °C ejercieron un efecto inhibitorio notable, con valores mínimos en todas las variedades. En particular, el número de raíces secundarias fue extremadamente reducido, llegando incluso a valores nulos. Este resultado coincide con lo descrito en otras especies, como *Helianthus annuus*, donde se ha demostrado que las bajas temperaturas reducen de forma drástica la emergencia de raíces laterales (Berge et al., 1998). En dicho estudio, se observó que a 10 °C el crecimiento lateral era muy limitado y a 5 °C prácticamente inexistente. Los autores atribuyeron este efecto a una inhibición térmica sobre los procesos de iniciación de raíces laterales, altamente dependientes de la actividad meristemática y hormonal, especialmente de las auxinas.

Por otro lado, se observó que, a partir de los 20 °C, tanto el desarrollo radicular como el de la parte aérea mostraron un comportamiento óptimo, manteniéndose elevado hasta los 30 °C. Aunque en esta última condición presentó un leve descenso en algunas variables, no se observaron signos evidentes de estrés térmico. Más específicamente, el crecimiento radicular fue máximo a 20ºC para todas las variedades estudiadas y el desarrollo del vástago alcanzo valores máximos a partir de 15 ºC. En el desarrollo radicular, en la variedad 2 a 25ºC también se obtuvieron valores altos, y la variedad 3 fue la más

adaptable, con valores máximos a temperaturas entre 20 ºC y 30ºC. En el crecimiento de la parte aérea, a partir de 15 ºC y hasta 30º C el crecimiento fue optimo en todas las temperaturas y variedades. Esta tolerancia a temperaturas elevadas podría estar relacionada con mecanismos de autorregulación celular. Kim et al. (2022) demostraron que *C. sativa* expresa proteínas como CsRCI2D, implicadas en la homeostasis de membranas bajo condiciones de calor, que favorecen tanto la germinación como el alargamiento inicial.

Aunque el presente ensayo se centró en la fase temprana de desarrollo y no abordó el contenido lipídico de las semillas, resulta pertinente considerar este aspecto dado el enfoque energético que presenta la especie. Kurasiak-Popowska et al. (2021) evaluaron el perfil de ácidos grasos de múltiples genotipos en condiciones variables de temperatura y precipitación durante cuatro años, concluyendo que la composición lipídica se mantuvo estable independientemente del clima. Por lo tanto, no esperamos que el contenido de lípidos cambie al cultivar las plantas en distintas temperaturas.

En resumen, podemos establecer que 30 °C es la condición más favorable en términos de rapidez de germinación, siendo la temperatura óptima de germinación 20ºC-25C en términos de desarrollo temprano de la plántula para las tres variedades estudiadas. Los resultados reforzaron la idea de que *C. sativa* es un cultivo resiliente, con un amplio rango térmico para su correcto desarrollo. Su capacidad para germinar con éxito y crecer bajo condiciones térmicas elevadas lo hace especialmente adecuado para regiones con climas cálidos, como el mediterráneo. Esta conclusión coincide con estudios como el de Zanetti et al. (2017), quienes destacaron la estabilidad del rendimiento de este cultivo en distintas condiciones agroclimáticas, incluyendo zonas cálidas del sur de Europa. Asimismo, su capacidad de preservar su contenido en aceites refuerza la idoneidad de la especie como cultivo oleaginoso robusto, capaz de preservar la calidad del aceite incluso bajo escenarios de cambio climático.

En cuanto a las diferencias entre variedades, la variedad 1 mostró una mayor velocidad de germinación. La germinación de la variedad 2 fue la más lenta en todas las condiciones, sin embargo, presentaba los valores más altos en el crecimiento de raíces y vástago en aquellas condiciones en las que observamos diferencias (a 20 °C y 25 °C en crecimiento radicular, y a 5 ºC y 10 ºC en crecimiento de vástago). Por su parte, la variedad 3 sobresalió en el número de raíces secundarias, mostrando un comportamiento intermedio

en el resto de los parámetros. Estas observaciones sugieren respuestas fisiológicas específicas según la variedad y el parámetro evaluado.

5.2. Efecto de la luz

En el presente ensayo, todas las variedades tuvieron una germinación final alta (≥94 % bajo los tres tratamientos lumínicos) sin diferencias significativas. Sin embargo, sí se observó que tanto en la variedad 1 como en la variedad 2 la germinación fue más rápida bajo luz en parte aérea y radicular, lo que indica una posible respuesta al estímulo lumínico. Este comportamiento podría estar relacionado con una mejor germinación en superficie, sin necesidad de sembrar y enterrar la semilla.

Respecto a la longitud de la radícula, los resultados indicaron la ausencia de diferencias significativas entre los tres tratamientos lumínicos en las tres variedades. Este hallazgo sugiere que, en *C. sativa*, la radícula no presenta una sensibilidad lumínica significativa, posiblemente debido a la ausencia o baja expresión funcional de fitocromos activos en la raíz. Este comportamiento indica la ausencia de estrés lumínico y contrasta con lo descrito por Costigan et al. (2011), quienes observaron que la exposición a la luz inhibía la elongación radicular en especies sensibles debido a la acción de fitocromos presentes en los tejidos subterráneos. No obstante, el número de raíces secundarias (NR) sí mostró diferencias significativas entre distintas condiciones de luz; se produjo un mayor número de raíces secundarias bajo condiciones de luz completa en todas las variedades. Cuando la parte radicular se encontraba en oscuridad, pero la parte aérea con luz, el número de raíces secundarias era menor, y aun se reducía más al crecer las plántulas en completa oscuridad. Este patrón sugiere que la exposición lumínica directa sobre la raíz estimula su ramificación lateral, en línea con los resultados descritos por Silva-Navas et al. (2015). En su estudio, los autores demostraron que la luz incidente sobre el sistema radicular promueve tanto la emergencia temprana como el aumento del número de raíces laterales. Por el contrario, mantener las raíces en oscuridad, incluso cuando la parte aérea recibe luz, revierte este efecto, lo que refuerza la hipótesis de que la incidencia de la luz sobre la raíz desempeña un papel clave en su ramificación.

La longitud del vástago se vio influida por las condiciones de oscuridad, según lo esperado. En todos los casos, la mayor elongación del vástago se produjo bajo oscuridad. Este patrón sugiere una respuesta característica de escotomorfogénesis, proceso en el cual las plántulas desarrolladas en oscuridad dirigen preferentemente sus reservas hacia la

elongación del hipocótilo con el objetivo de alcanzar una fuente de luz, a expensas del desarrollo radicular (Deepika et al., 2020). La exposición de luz únicamente en la parte aérea produjo valores similares a los de luz en parte aérea y radicular en las variedades 1 y 3, mientras que la variedad 2 mostró un mayor crecimiento solo bajo luz en parte aérea (oscuridad en la sección radicular). Dado que ni la longitud de la radícula ni el crecimiento del vástago se vieron afectados por la luz de forma importante (excepto por el efecto esperado de la oscuridad en la elongación del hipocótilo y la luz en la promoción de raíces secundarias), se concluye que la luz no ejerce un impacto relevante en el desarrollo de plántulas de *C. sativa.*

Asimismo, el presente ensayo mostró también una tendencia inversa en las tres variedades, donde a medida que disminuye la disponibilidad lumínica, aumenta el peso fresco (PF) medio de las plántulas. Este aumento bajo oscuridad puede explicarse por la activación de procesos de escotomorfogénesis, caracterizados por la elongación celular y la expansión tisular inducida hormonalmente, especialmente por auxinas (Deepika et al., 2020). Esta estrategia puede interpretarse como una forma de optimización de recursos: en ausencia de luz, las plántulas no pueden fijar carbono por fotosíntesis y dependen exclusivamente de las reservas de la semilla. Ante esta limitación, movilizan esas reservas priorizando el desarrollo de estructuras aéreas (como el vástago) que les permitan alcanzar la fuente lumínica, generando así mayor biomasa fresca, aunque sin un incremento proporcional en el contenido de materia seca. Este comportamiento también se enmarca en el denominado síndrome de evasión de sombra (*shade avoidance*), ampliamente descrito por Franklin (2008), según el cual las plantas, al detectar niveles bajos de luz o una disminución en el cociente rojo/lejano rojo, promueven el crecimiento en altura a expensas del desarrollo lateral o radicular. Aunque el estudio de Franklin se centra en estadios más avanzados del desarrollo, este marco fisiológico permite comprender que, incluso en plántulas, pueden activarse respuestas adaptativas tempranas ante señales de limitación lumínica.

Por otro lado, el hecho de que el peso seco no se haya visto afectado por la luz, pero sí por la variedad, sugiere una base genética en la eficiencia de acumulación de biomasa estructural, coherente con lo descrito por Lin et al. (2010), quienes concluyeron que el impacto de factores ambientales sobre la biomasa seca está fuertemente condicionado por el genotipo y el órgano evaluado.

En cuanto a la comparación de variedades, no se identificó una variedad claramente superior en el conjunto de condiciones evaluadas, ya que cada una mostró un comportamiento diferencial según la variable analizada y el entorno lumínico. La variedad 1 presentó una velocidad de germinación significativamente superior, algo que ya habíamos observado en los ensayos en distintas temperaturas. En condición de luz en toda la plántula, la variedad 2 destacó por presentar valores significativamente superiores en longitud de radícula, longitud del vástago y peso seco, lo que podría indicar que esta variedad presenta una mayor eficiencia en el uso de recursos disponibles bajo fotoperiodo completo. Por otro lado, bajo luz solo en la parte aérea y oscuridad en la zona radicular, la variedad 3 mostró los rendimientos más bajos, siendo significativamente inferior en longitud del vástago y número de raíces secundarias, lo que sugiere una menor capacidad de adaptación a situaciones de luz asimétrica. En condiciones de oscuridad en toda la plántula, fue la variedad 3 la que registró un peso seco significativamente mayor, lo que podría reflejar una estrategia más eficiente en la movilización de reservas bajo condiciones de ausencia lumínica, en contraste con su bajo desempeño en otras variables. Estos resultados evidencian que las respuestas fisiológicas de *C. sativa* varían parcialmente entre variedades, por lo que se debe tener en cuenta dichas diferencias al seleccionar el sistema de siembra y las condiciones de luz esperadas en campo.

En definitiva, la capacidad de *C. sativa* para mantener una germinación elevada bajo diferentes condiciones lumínicas y su sensibilidad varietal a ciertos parámetros de desarrollo inicial refuerzan su potencial como cultivo adaptable. Hosseini Sanehkoori et al. (2023) también destacan la plasticidad ambiental de esta especie, mostrando su capacidad de germinar eficientemente en un amplio rango de condiciones fisicoquímicas.

5.3. Efecto del estrés hídrico y salino

En este trabajo se ha estudiado el efecto del estrés salino o hídrico a concentraciones equivalentes: -0.7 MPa. Los resultados obtenidos muestran que mantiene una elevada capacidad germinativa bajo condiciones de estrés salino y osmótico a -0.7 MPa, ya que no se observaron diferencias significativas en el porcentaje final de germinación. La tolerancia que presenta la especie (puesto que ha presentado porcentajes de germinación bastante elevados), podría deberse a mecanismos de ajuste osmótico en la planta, como la acumulación de prolina y azúcares solubles (Ahmed et al., 2017).

Sin embargo, la velocidad de germinación se redujo en ambos estreses de forma significativa, lo que se vio reflejado en el parámetro T50. En lo que respecta el estrés salino, otros autores han comprobado que, aunque *C. sativa* tolera concentraciones moderadas de NaCl en términos de porcentaje germinativo, este factor provoca una ralentización en la velocidad de germinación (Gebremedhn et al. 2020). Cabe señalar que dicho estudio experimentó con una concentración máxima de 5g de NaCl/l, que equivaldría a un potencial osmótico de ≈ -0.43 MPa, notablemente inferior a la concentración aplicada en el presente trabajo**.** A nivel fisiológico, el retraso en la germinación puede producirse por distintas causas. Por un lado, la reducción del potencial hídrico y el descenso en la turgencia celular dificultan la expansión celular y retrasan la emergencia de las estructuras embrionarias (Morales et al. 2017). Por otro, el estudio de Heydarian et al. (2018) explica que, la especie adopta varios sistemas regulatorios para manejar dicho estrés. Entre ellos encontramos un aumento en los niveles de calcio y magnesio para mantener la homeostasis osmótica y funcionalidad celular. Asimismo, se activa la expresión de genes relacionados con la síntesis de metabolitos secundarios como lignina, ceras y antocianinas, indicando una respuesta de protección frente a la desecación y al estrés ambiental. En las raíces, se activa el sistema SOS para la exportación de sodio y se observa el aumento en la captación de potasio. La activación de todos estos mecanismos podría contribuir a retardar la germinación como mecanismo de protección frente a ambientes desfavorables.

Por otra parte, el estrés hídrico parece tener un efecto más marcado en la velocidad de germinación que el estrés salino a concentraciones equivalentes, lo que podría deberse a que las soluciones salinas permitan cierta absorción gradual de agua, mientras que el estrés hídrico generado por PEG causa una restricción más inmediata y uniforme en la disponibilidad hídrica para la semilla. Un mayor efecto negativo del estrés hídrico respecto al estrés osmótico también se ha documentado en artículos como el de Hosseini Sanehkoori et al. (2021), que registraron respuestas similares en una variedad de *C. sativa*.

En cuanto a las variables que evaluaron el desarrollo radicular y aéreo, los resultados muestran una clara respuesta negativa en las plántulas sometidas a estrés, en comparación con las condiciones control. En el caso de la longitud media de radícula, se observó una respuesta escalonada en las variedades 2 y 3, lo que indica una alta sensibilidad a condiciones de estrés, especialmente al estrés salino (Control>EO>ES). Según Gebremedhn et al. (2020) y Heydarian et al. (2018), el estrés salino conlleva una

disminución del potencial hídrico externo y un incremento de la toxicidad iónica, lo cual dificulta la turgencia celular y limita la elongación de las raíces. El número de raíces secundarias (NR) a su vez, fue la variable más severamente afectada por el estrés en las tres variedades. Bajo condiciones salinas, prácticamente no se desarrollaron raíces laterales, y bajo estrés hídrico también se observaron reducciones significativas. Esta inhibición del desarrollo lateral ha sido documentada como una estrategia adaptativa frente al estrés, en la cual la planta prioriza el mantenimiento del eje principal de la raíz sobre la formación de ramificaciones laterales (Silva-Navas et al., 2015).

Respecto al desarrollo del vástago, las tres variedades mostraron una tendencia similar: una reducción especialmente marcada bajo estrés osmótico. Esta disminución podría deberse a una estrategia de conservación hídrica, ya que un mayor crecimiento del vástago implica una mayor superficie para la transpiración y, por tanto, un mayor riesgo de pérdida de agua a través de los estomas. Este comportamiento ha sido descrito por Farquhar y Sharkey (1982), quienes señalan que el incremento de la transpiración puede provocar descensos del potencial hídrico foliar, lo que limita la elongación celular y activa respuestas de cierre estomático como mecanismo adaptativo.

Asimismo, los resultados del presente ensayo muestran que el estrés hídrico y salino afectan de forma diferenciada al peso fresco (PF) y al peso seco (PS) de *C. sativa* durante la fase inicial de desarrollo. En el caso del peso fresco, se observó una disminución significativa bajo estrés hídrico, especialmente en las variedades 1 y 3. Esta respuesta sugiere que el déficit de agua ejerce un impacto más severo sobre la acumulación de biomasa fresca que la salinidad. La reducción del PF podría atribuirse a una disminución del tamaño foliar para reducir pérdidas de agua durante la fotosíntesis. Esta interpretación coincide con lo descrito por Ahmed et al. (2017), quienes señalaron que la escasez de agua induce una supresión del crecimiento celular, debido a la limitación en la apertura estomática y su consecuente efecto sobre la asimilación de carbono.

En contraste, el peso seco no se vio significativamente influido por los tratamientos en la mayoría de los casos, con excepción de la variedad 3, que registró un aumento de biomasa bajo ambas condiciones de estrés. Esta misma variedad también presentó un mayor peso fresco en condiciones de estrés salino. Es posible que estas respuestas estén relacionadas con una mayor capacidad adaptativa de origen genético, lo que podría conferirles una tolerancia diferencial frente a condiciones adversas.

Finalmente, el estudio mostró que, bajo condiciones de estrés, las tres variedades presentaron comportamientos similares. Esto sugiere que, en situaciones adversas, el estrés tiende a homogeneizar la respuesta fisiológica entre genotipos, diluyendo las diferencias observadas en condiciones óptimas.

VI. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS

Los resultados de este estudio muestran que *C. sativa* posee una notable tolerancia térmica durante las primeras fases de desarrollo. Aunque las temperaturas más bajas ralentizaron el crecimiento inicial, no provocaron una disminución significativa de la germinación final a los siete días, y las condiciones térmicas elevadas tampoco afectaron negativamente al establecimiento de las plántulas. Esta amplitud en el rango de tolerancia confirma su capacidad de adaptación a escenarios de cambio climático y respalda su potencial agronómico en zonas del interior peninsular con clima mediterráneo continental, como la provincia de Toledo. Gracias a esta resiliencia, los periodos de siembra podrían planificarse de forma flexible, abarcando desde finales de invierno hasta comienzos de verano o desde finales de verano hasta inicios de invierno. Además, el comportamiento térmico homogéneo observado entre variedades sugiere una plasticidad común en el germoplasma evaluado, lo que permitiría que, en un contexto productivo real, la elección varietal se base en criterios económicos o en otros factores agronómicos más que en su tolerancia a la temperatura.

En relación con la luz, se comprobó que no constituye un factor limitante para la germinación final, lo que otorga al cultivo una gran versatilidad en cuanto a sistemas de siembra.

Por otra parte, *C. sativa* mantuvo una elevada capacidad germinativa bajo condiciones de estrés hídrico y salino, sin que se detectaran diferencias significativas en el porcentaje final de germinación ni en la proporción de plántulas normales. No obstante, ambos tipos de estrés ralentizaron el proceso germinativo, un aspecto que conviene considerar en la planificación del cultivo en áreas con riesgo de sequía o salinidad.

En cuanto al desarrollo morfológico, el estrés salino fue el factor que provocó una mayor inhibición de la longitud de radícula y del número de raíces secundarias, reduciendo la capacidad de exploración del suelo y, por ende, la absorción de agua y nutrientes, lo que podría traducirse en una disminución del rendimiento. El estrés hídrico, en cambio,

mostró un efecto más marcado sobre la longitud del vástago y el peso fresco, lo que sugiere una estrategia adaptativa basada en limitar el crecimiento aéreo para reducir la pérdida de agua por transpiración.

En conjunto, estos resultados confirman el potencial de *C. sativa* como cultivo energético adaptable y resiliente, capaz de establecerse en un amplio rango de condiciones ambientales, y ofrecen información valiosa para su manejo agronómico en entornos mediterráneos con limitaciones hídricas o edáficas.

VII. PROYECTO: DISEÑO E IMPLANTACIÓN DEL CULTIVO

7.1. MOTIVACIÓN Y DIRECTRICES DEL PROYECTO

La Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas de la Universidad Politécnica de Madrid impulsa el presente proyecto tras identificar la necesidad de buscar cultivos energéticos sostenibles, adaptados a las particularidades del clima mediterráneo, y cuya plantación resulte realista y rentable. La Camelina sativa (L.) Crantz se presenta como una alternativa prometedora debido a su rusticidad, baja demanda de insumos y potencial uso en la producción de biocombustibles.

La motivación principal del proyecto es evaluar la implantación de este cultivo en una parcela piloto de 1,16 ha en Mora (Toledo), con el fin de analizar su capacidad de adaptación en condiciones de secano y generar información útil para futuros proyectos. De este modo, se podrá analizar su viabilidad agronómica y económica.

El promotor del proyecto establece una serie de condicionantes clave que orientan su desarrollo. En primer lugar, la sostenibilidad, asegurando que la producción se ajuste a los principios de la agricultura de conservación y minimice el impacto ambiental. En segundo lugar, la eficiencia, de manera que la implantación del cultivo tenga en cuenta las características edafoclimáticas y estructurales de la parcela, con el objetivo de optimizar los recursos disponibles y maximizar la productividad. Finalmente, la viabilidad económica, que implica que la inversión inicial y los costes de explotación se mantengan dentro de márgenes razonables, al tiempo que se aspire a alcanzar un retorno positivo a medio plazo, condicionado por los rendimientos obtenidos en campo, la evolución de los precios del grano y la paja, y los costes efectivos de explotación.

Asimismo, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas de la Universidad Politécnica de Madrid valora positivamente que la parcela pueda brindar nuevos puestos de trabajo a la población local de la zona, durante las diferentes fases del proceso productivo. De igual manera, se busca que este proyecto impulse la economía circular mediante el aprovechamiento tanto del grano como de los restos vegetales, con un enfoque especial en el desarrollo de alternativas sostenibles aplicables a otros sectores. Finalmente, se espera que la iniciativa contribuya a la reducción de la huella de carbono, con énfasis en el sector de la aviación, en coherencia con las metas europeas de descarbonización y transición energética a nivel global. No obstante, a la escala de la parcela piloto, la contribución es principalmente de carácter demostrativo y está orientada a generar evidencia técnica y agronómica que sustente futuros procesos de escalado.

7.2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA

7.2.1. Área del proyecto

El proyecto se desarrollará en una única parcela que aporta la superficie necesaria para la actividad, situada en el municipio de Mora (Toledo). La selección se efectuó tras un análisis estratégico escalonado, partiendo del ámbito nacional hasta la identificación de la parcela concreta. Por razones logísticas y de gestión se delimitó el estudio al territorio español. A escala estatal, los datos del MAPA (2017–2023) muestran que *C. sativa* se concentra como cultivo de secano en Castilla-La Mancha, Castilla y León y Aragón, siendo Toledo una de las provincias con mayor continuidad histórica (véase Anejo II).

Dentro de la provincia, se identificó Mora como ubicación idónea por: (i) presencia previa del cultivo en la zona; (ii) disponibilidad de un perfil edafológico detallado; y (iii) condición de terreno marginal no competitivo con la agricultura alimentaria.

La parcela, con una superficie de 1,16 ha, presenta pendientes superiores al 20 %, alcanzando valores por encima del 30 % en los bordes norte. Estas condiciones topográficas condicionan la mecanización y elevan el riesgo de erosión; de ahí la planificación con márgenes de 2,5 m y cabeceras de 6 m (véase Anejo V) y está clasificada en Catastro como pasto arbustivo. Estas particularidades son limitantes para cultivos convencionales pero compatibles con especies rústicas. El análisis multitemporal de NDVI confirma ausencia de actividad agrícola reciente y cobertura vegetal escasa, reforzando su carácter marginal (véase Anejo V, Mapa 4). En este sentido, el patrón NDVI

bajo y estable, junto con la clasificación catastral, confirman el carácter marginal y la ausencia de presión agrícola, respaldando la idoneidad de implantar un cultivo no alimentario y de bajo insumo como *C. sativa.*

El clima local se caracterizó con la estación agroclimática de Mora (SIAR, código TO12; 2008–2024), situada a < 10 km. El diagrama ombrotérmico evidencia un patrón mediterráneo, con meses secos de finales de abril a mediados de septiembre. La zona se clasifica como BSk (Köppen) y mediterráneo templado-fresco (Papadakis), con inviernos algo fríos y veranos moderadamente cálidos; la precipitación es marcadamente estacional (primavera-otoño lluviosos; verano seco) (véase Anejo III).

Desde el punto de vista edáfico, el perfil S042 (dentro de la parcela) presenta dos horizontes relevantes para C. sativa: 2Btb, de textura arcillosa, mayor compactación y bajo contenido de materia orgánica, que limita su calidad agronómica; y 2Ab, de textura franca, mayor MO, densidad aparente adecuada y pH básico dentro del rango de tolerancia de la especie, sin salinidad problemática. La capacidad de retención de agua disponible se estima moderada, compatible con manejo en secano (véase Anejo III).

En cuanto a condicionantes externos, el entorno socioeconómico ofrece oportunidades. Mora cuenta con 9.930 habitantes (INE, 2024) y una renta media por persona de 18.790 € (AEAT, 2022). En este contexto, la retribución prevista al Salario Mínimo Interprofesional (SMI) para labores operativas agrícolas se considera competitiva a nivel local, por lo que no se prevén tensiones de contratación ni necesidad de primas salariales adicionales para cubrir los puestos previstos.

El municipio es, además, referente comarcal en olivar y producción de aceite de oliva, lo que se refleja en su tejido socioeconómico y recursos culturales; en el entorno inmediato de la parcela se observan recintos con olivares (Ayuntamiento de Mora, s. f.).

7.2.2. Situación futura “sin proyecto”

En caso de no llevarse a cabo el proyecto, la parcela mantendría su clasificación actual como pasto arbustivo, sin desarrollarse para un uso agrícola. La presencia de matorral denso y la ausencia de actividad ganadera en la zona descartan un aprovechamiento pastoril significativo. A ello se suma la marcada pendiente, que refuerza el carácter marginal del terreno. En conclusión, la falta de opciones productivas, unida a las

limitaciones topográficas, dificulta incluso un uso silvopastoril, consolidando la improductividad de la situación *sin proyecto*.

7.2.3. Generación de alternativas

A continuación, se describen las alternativas posibles:

- Alternativa 1: Mantener la parcela en su estado original, sin ningún proyecto
- Alternativa 2: Implantación de una variedad invernal de *C. sativa* en secano con mínimo laboreo y siembra superficial
- Alternativa 3: Implantación de una variedad primaveral de *C. sativa* en secano con mínimo laboreo y siembra superficial
- Alternativa 4: Implantación de *C. sativa* en regadío
- Alternativa 5: Implementación de otro cultivo agrícola en secano

7.2.4. Metodología DAFO

Para determinar que alternativa pueden ser viables y alineadas con los criterios del presente proyecto se recurrirá a aplicar la estrategia DAFO. Este análisis, cuyas siglas indican Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades constituye una herramienta que permite conocer los factores externos e internos que impactan en el éxito o viabilidad de un proyecto (UNIR, 2024). Seguidamente se aplicará dicho análisis para cada alternativa:

- Alternativa 1:
    - D: Improductividad económica.
    - A: Riesgo de incendio.
    - F: Coste nulo y no requiere actuaciones.
    - O: Conservación de fauna y flora local.
- Alternativa 2:
    - D: Poca superficie, incapacidad de escala y localización de pendientes pronunciadas.
    - A: Riesgo de sequía y de heladas
    - F: Alineada con objetivo TFG, de bajo coste y aprovecha la pluviometría anual.
    - O: Mercado creciente de materias primas oleaginosas para bioenergía.
- Alternativa 3:

    - D: Balance hídrico negativo y por lo tanto estrés hídrico
    - A: Mayor competitividad con otras especies, y olas de calor
    - F: Ciclo corto. Posibilidad de rotación
    - O: Mercado creciente de materias primas oleaginosas para bioenergía.
- Alternativa 4:
    - D: Mayor coste e inversión
    - A: Incompatibilidad con las ayudas de la PAC
    - F: Mayor producción
    - O: Mercado creciente de materias primas oleaginosas para bioenergía.
- Alternativa 5:
    - D: Dificultad de establecimiento. Mayores insumos.
    - A: Cambios en los precios, dependencia del mercado, mayor competitividad
    - F: Proceso y tecnologías conocidos
    - O: Mayor facilidad de vender el producto

7.2.5. Matriz multicriterio y selección de la alternativa

Para la elaboración de la matriz multicriterio se definieron cinco criterios de evaluación (C1–C5). En este caso, todos los criterios se consideraron con igual ponderación. En la Tabla 4 se recogen las diferentes alternativas con la puntuación recibida en cada criterio. La puntuación es del 1 al 5, siendo el 5 la máxima puntuación.

Criterios:

- C1 Alineación con objetivos TFG (sostenibilidad, bioenergía, etc)
- C2 Viabilidad técnica
- C3 Riesgo de erosión
- C4 Viabilidad económica
- C5 Rendimiento

Escala: 1 = muy desfavorable · 3 = medio · 5 = muy favorable

Tabla 4. Matriz multicriterio

	C1	C2	C3	C4	C5	**TOTAL**
A1	1	5	3	5	1	15
A2	5	3	3	4	4	**19**
A3	4	3	3	4	3	17
A4	4	2	3	2	5	16
A5	1	3	2	4	3	13

La aplicación de la matriz confirmó que la Alternativa 2 obtiene la mayor puntuación. Esta opción resulta, además, coherente desde un punto de vista estratégico, ya que es compatible con las disposiciones de la Política Agraria Común (PAC), minimiza la necesidad de insumos y reduce posibles conflictos con cultivos alimentarios.

7.3. INGENIERÍA DEL PROCESO

La parcela sobre la cual se llevará a cabo la plantación cuenta con una superficie total de 1,16 ha. No obstante, los lindes situados en la zona norte presentan valores de pendiente elevados (véase Anejo V: Mapa 2). Considerando también la necesidad de habilitar caminos para el tránsito de maquinaria, se ha optado por mantener márgenes laterales de 2,5 m. Esta medida, además de facilitar las labores agrícolas, contribuye a minimizar las pérdidas de suelo por erosión y establece una delimitación natural y funcional de la parcela. Asimismo, se han reservado 6 m en cada extremo del terreno para su uso como cabeceras, que facilitarían las maniobras de giro de los aperos y evitaría daños sobre el cultivo una vez implantado.

El aprovechamiento del resto del terreno está programado para mediados de septiembre, con la siembra de una variedad otoñal. Las fechas exactas quedan sujetas a las condiciones meteorológicas en el momento de la implantación. La cosecha se prevé a finales de mayo o principios de junio, coincidiendo con la maduración del cultivo.

En la Figura 18, se observa el proceso de implantación del cultivo, que posteriormente será detallado:

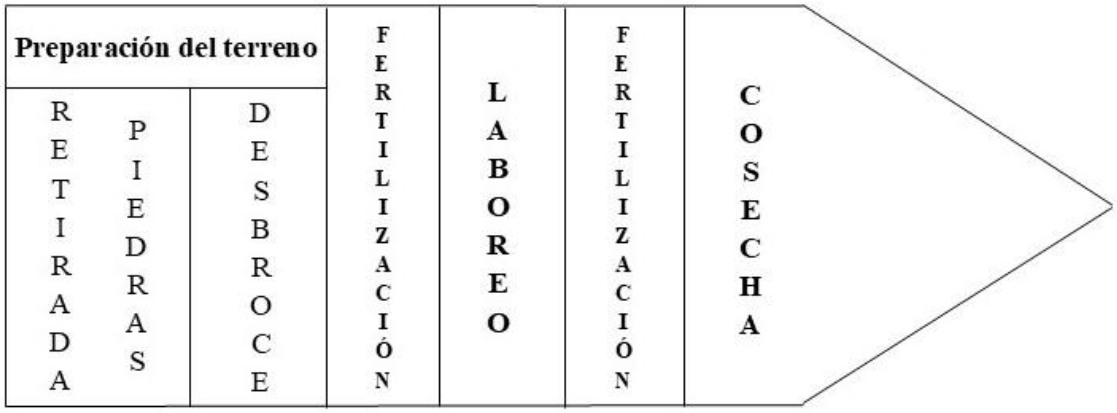


Figura 18. Esquema del proceso de implantación para el cultivo de C. sativa

- **Preparación del terreno:**

La preparación inicial consistió en la realización de dos tareas fundamentales: la retirada puntual de piedras de gran tamaño y el desbroce de la vegetación existente. Se opta por el no laboreo (siembra directa) con el fin de minimizar el uso de maquinaria en un terreno con pendiente y pedregosidad, reducir las pérdidas por erosión y evitar un agravamiento de la compactación del horizonte 2Btb.

- **Fertilización:**

Posteriormente, y para asegurar la disponibilidad suficiente de nutrientes para el cultivo se procedió con la fertilización. Este primer abonado recibe el nombre de abonado de fondo, y se realizó con un fertilizante complejo NPK que aporta fósforo y potasio, junto con una fracción inicial de nitrógeno y azufre.

La segunda fertilización, conocida como abonado de cobertera se aplicó en el estado de roseta, suministrando el resto de las unidades fertilizantes de N y S necesarias para completar las necesidades nutricionales. Las estimaciones de dosis (calculadas en el anejo IV) vienen recogidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Dosis y costes de fertilizantes aplicados en la parcela (abonado de fondo y cobertera).

Fertilizante	Dosis aplicado en la parcela (0.96 ha)		Cuantía nutricional	Coste
Fertilizante complejo N-P-K (8-24-24)	276 Kg		69 Kg P_2O_5 69 Kg K_2O 23 Kg N	55 €/ 100 Kg
Fertilizante sulfato amónico	Fondo	12.96 Kg	2 Kg N 7.2 Kg S	31 €/ 100 Kg
	Cobertera	134.4 Kg	56 Kg N 17.5 Kg S	

- **Siembra:**

La implantación se llevó a cabo mediante siembra directa a chorrillo, con una separación de líneas de 16,6 cm, profundidad de 0,5–1,5 cm (véase Anejo V: Plano 2) y dosis de 8–10 kg/ha, valores en línea con las recomendaciones de Camelina Company (2021). Esta elección se relaciona con los resultados del ensayo de luz: las semillas germinaron más rápidamente en condiciones de oscuridad (menor T50), lo que respalda la necesidad de una siembra superficial que asegure cobertura frente a la luz sin exceder una profundidad que pueda dificultar la emergencia.

- **Manejo del cultivo**:

Debido a la naturaleza de la especie y en consonancia con los principios de la agricultura de conservación, en el presente proyecto se prescinde del uso de herbicidas y fitosanitarios. El manejo de malas hierbas se plantea en varias fases: i) desbroce previo de la vegetación existente, ii) siembra en contorno con el fin de estabilizar el suelo, y iii) vigilancia post-emergencia para evitar que las adventicias superen a la camelina durante las primeras semanas de desarrollo. Como medida de contingencia, en caso de detectarse una presencia significativa y dañina de malas hierbas, se contempla la posibilidad de aplicar un control mecánico localizado.

- **Cosecha:**

La recolección se realizará cuando los frutos presenten un cambio de color de verde a amarillo cremoso, evitando retrasos superiores a 7–10 días para reducir pérdidas por dehiscencia.

7.4. EVALUACIÓN FINANCIERA

En el presente apartado se analizarán los costes y beneficios asociados al proyecto, con el objetivo de estimar su rentabilidad a través de indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para ello, se ha considerado una vida útil de la parcela de 10 años.

Cabe señalar que, si bien la parcela presenta una superficie total de 1,16 ha, únicamente se sembrarán 0,96 ha, destinándose el resto a caminos de acceso, cabeceras y márgenes laterales en las zonas de mayor pendiente, que servirán para el transporte interno, el paso de maquinaria y la delimitación de la finca (Verse Anejo V).

7.4.1. Estimación de costes

En primer lugar, se analizaron los costes asociados al proyecto. Se tuvo en cuenta tanto la inversión inicial (semillas, maquinaria…), el presupuesto para el arrendamiento del terreno, la realización de las labores, tal como podemos observar en la Tabla 6. La estimación de los costes operativos anuales incluye gastos en mano de obra, materias primas y transporte.

En primer lugar, se ha valorado en 100 €/año el arrendamiento de la parcela, en coherencia con su carácter marginal y con precios habituales en este tipo de terrenos. Dado que el ciclo del cultivo abarca únicamente nueve meses (de septiembre a mayo), se ha ajustado proporcionalmente el importe, resultando en un coste total de 75 euros.

Respecto al valor de la semilla, los informes más recientes consultados indican un coste de adquisición de 39,60 €/ha (equivalente a una densidad de siembra de 8 kg/ha) (Camelina Company, 2021). Se observa, además, que este valor se ha mantenido constante durante al menos los ocho años anteriores, lo que la permite considerarlo una cifra de referencia. Puesto que únicamente se siembra 0.96 ha, el precio final resultante se fija en 38 euros.

Consultando el Índice de Precios Pagados por los Agricultores (MAPA, 2025), se ha constatado que el precio de referencia de un fertilizante complejo para el abonado de fondo se sitúa en torno a 55 €/100 kg, mientras que el precio del sulfato amónico (21 %) es de aproximadamente 31 €/100 kg. Estos valores se han tomado como referencia para la estimación de costes de fertilización en el presente proyecto.

En el abonado de fondo se aplican 276 kg de fertilizante complejo NPK/parcela, lo que supone un coste de 151,8 €. Por su parte, el sulfato amónico se aplica en dos fases (13,5 kg en fondo y 140 kg en cobertera), siendo un total de 153,5 kg/parcela, que asciende a un total de 45,6 €. En conjunto, la fertilización de la parcela implica un gasto estimado de 197,37 euros.

En relación con la maquinaria necesaria, en la mayor parte de tareas se ha optado por considerar el coste de alquiler, dado que las labores del proyecto son puntuales y no justifican la compra de equipos propios. Tras contactar con diferentes empresas, se han obtenido los siguientes precios orientativos:

- Desbrozadora: 60 €/día, suponiendo que un dia son 8h laborales, 1 hora equivaldría a 8 €/h y 3 horas a 24€/h .
- Sembradora: 80 €/día. De forma similar al cálculo anterior, 1 hora equivaldría a 10€/h.
- Cosechadora: 65 €/día (8€/h).
- Abonadora manual: coste de adquisición aproximado de 200 €.

Se ha optado por la compra de una abonadora manual en lugar de recurrir al alquiler de un servicio externo de abonado con abonadora centrífuga. Esta decisión se justifica en que la adquisición de una abonadora manual (200 €) resulta económicamente más rentable a medio plazo que el alquiler puntual de una abonadora centrífuga, cuyo coste se sitúa en torno a 100 €/día, a lo que habría que añadir los gastos asociados al operario encargado de la labor. Considerando la reducida superficie del proyecto (0,96 ha) y la frecuencia limitada de aplicación, la compra de la abonadora manual representa la alternativa más eficiente.

Para el coste del personal se necesitará:

- 1 operario para la retirada de piedras que dificulten el paso de maquinaria por los bordes, y piedras de gran tamaño durante 1 día con un salario individual de 10 euros/h. Suponiendo que trabaja una jornada laboral de 8h, esto sumaria un total de 80 euros.
- 1 operario que realice el desbroce. Con capacidad efectiva de 0,455 ha/h y una superficie a desbrozar de 1,16 ha, se requieren aproximadamente 3 h de trabajo. Por lo tanto, el coste sería de 30 euros.
- 1 operario que realice la labor de siembra, cuyo salario será 10 euros/h.

- 1 operario que realice la labor de abonado. Dado que la capacidad de trabajo efectiva es de 0,325 ha/h, se requieren aproximadamente 3 horas de labor, a las que se añade 1 hora de descanso. Considerando que la parcela será abonada en dos ocasiones (abonado de fondo y abonado de cobertera), el tiempo total asciende a 8 horas. A un salario de 10 €/h, el coste asociado al operario es de 80 €.
- 1 operario para realizar la cosecha, cuyo salario será 10 euros/h.

Respecto a la labor de operarios y dado que se trata de tareas que no requieren especialización ni conocimientos técnicos avanzados, se ha considerado como referencia el salario mínimo nacional, equivalente a 10€/hora y operario. En total suman 210 euros.

Finalmente, se ha considerado el coste de transporte de la cosecha hasta el punto de acopio local, situado a una distancia aproximada de 30 km desde la parcela. A partir de los datos publicados en el *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera* (MITMA, 2025), y tomando como referencia la categoría vehículo rígido de 2 ejes de distribución (1,14 €/km), se ha estimado un gasto total de 34,2 € para el trayecto de ida. En este proyecto solo se imputa el trayecto de ida porque el transportista realiza el viaje de retorno con otra carga contratada en la zona de destino, de manera que no repercute el coste del regreso vacío al productor.

Tabla 6. Costes de explotación

Estimación de costes		
		Precio (€)
Costes de inversión		
1- Maquinaria		
a- Abonadora centrífuga	200.00	
Total (euros)		**200.00**
Costes anuales		
1- Mano de obra		
a- Operarios	210.00	
Total (euros)		**210.00**
2- Materias primas		
a- Semillas	38.00	
b- Fertilizantes	197.37	
Total (euros)		**235.37**

3- Maquinaria		
a- Alquiler	42.00	
Total (euros)		**42.00**
4- Transporte	34.2	
Total (euros)		**34.20**
5- Terreno		
a- Alquiler	75.00	
Total (euros)		**75.00**
Total costes anuales (euros)		**596.59**

7.4.2. Estimación de beneficios

La evaluación financiera también analizó los ingresos esperados derivados de la venta de granos de camelina y pajas y restos de cosecha. Los valores de producción de ambos productos se pueden observar en la Tabla 7.

Respecto al rendimiento de grano esperado, la bibliografía recoge valores variables de producción para variedades otoñales de la especie en condiciones de secano, con un rango que oscila entre 1.000 y 3.000 kg/ha, y un precio de venta de 350 €/t (Ablanque et al., 2018; Mostaza-Colado et al., 2020; Camelina Company, 2024). Para el presente análisis se adopta un valor intermedio de 1.500 kg/ha, que, aplicado a la superficie cultivada de 0,96 ha, equivale a una producción estimada de 1.440 kg.

A efectos de este proyecto, se adopta un valor de 80 €/ha como ingreso neto estimado por la paja, cifra coherente con valores orientativos de mercado y utilizada con fines de aproximación económica. El valor adaptado a la superficie cultivada resulta en 76.8 €.

Tabla 7. Ingresos de la explotación

Estimación de costes		
		Precio (€)
Grano	504.00	
Paja (80 €/ha)	76.8	
Ayuda PAC (40.16 €/ha)	38.55	
Total ingresos anuales (euros)		**619.35**

7.4.3. Flujo de caja

El flujo de caja es la diferencia entre ingreso y costes e inversiones en cada año del proyecto. En la Figura 19 se recogen los costes e ingresos estimados para la plantación de camelina.

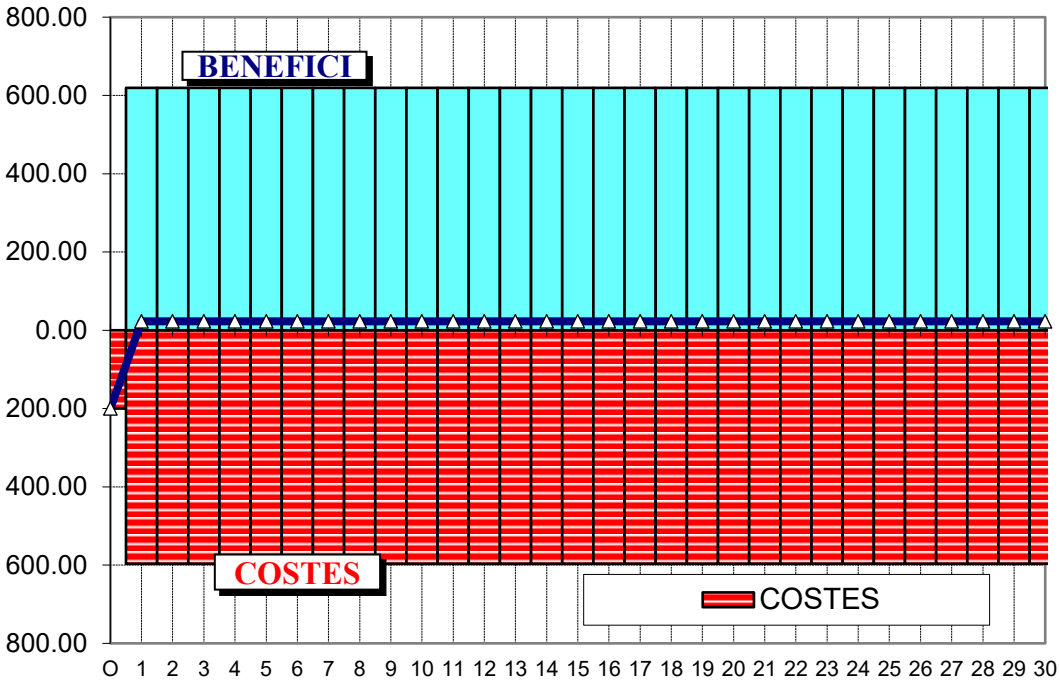


Figura 19. Diagrama flujo de caja

Se observa que, desde el primer año, el proyecto podría comenzar a generar beneficios (+22.76 €). No obstante, este resultado debe interpretarse con cautela, ya que está sujeto a la incertidumbre asociada tanto a los precios de mercado como a los rendimientos en campo.

7.4.4. Indicadores de rentabilidad

Como se había indicado anteriormente, se emplearán los indicadores VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa Interna de Retorno) para calcular la rentabilidad del proyecto.

El análisis financiero se ha realizado considerando un horizonte temporal de 10 años, en coherencia con la vida útil prevista del proyecto. Se adopta una tasa de descuento del 10 %, justificada como el coste de oportunidad de capital en un micro-proyecto agrícola de carácter demostrativo, en el que el riesgo percibido es elevado y las alternativas de inversión presentan rendimientos similares.

- Valor Actual Neto (VAN)

Según BBVA (2025), el Valor Actual Neto es el valor que tendrían en el momento actual todos los cobros y pagos que se prevé que genere en el futuro un determinado activo financiero. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{t=0}^{n} \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0$$

Donde

- VAN: Valor Actual Neto
- Ft: flujo neto de caja en el año t (ingresos menos costes en ese año).
- r: tasa de descuento y refleja el coste de oportunidad del capital o rentabilidad mínima exigida al proyecto (en tu caso, 10 %).
- I_0: inversión inicial realizada en el año 0 (coste de implantación del proyecto).
- n: horizonte temporal considerado (en tu TFG, 10 años).

Este indicador, al fijar una tasa de descuento en 10% presenta un valor positivo de 14.56 €, que indica que el proyecto es rentable. No obstante, es un valor muy ajustado que indica que el proyecto es muy sensible, y que por poca variación podría dejar de ser viable. En la Figura 20, se muestra la evolución del VAN.

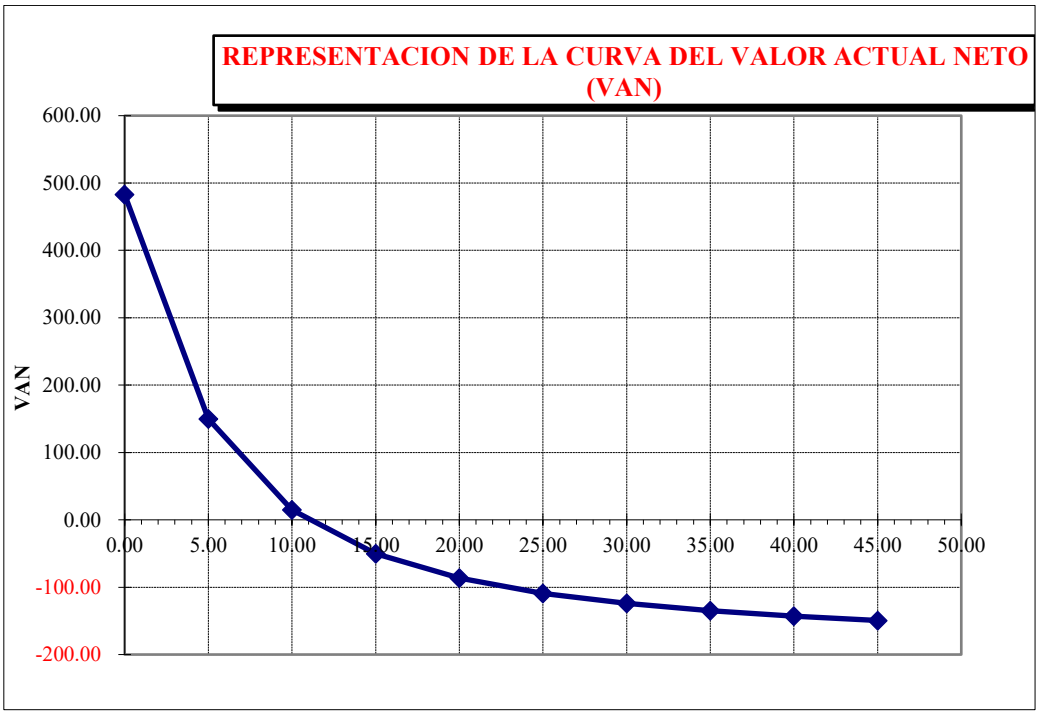


Figura 20. Representación de la curva del Valor Actual Neto (VAN)

- Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno es una tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto o inversión sea igual a cero (Fernández de la Cigoña, 2025).

$$VAN = \sum_{t=0}^{n} \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0$$

El cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) presenta un valor de 11 %, siendo superior a la oportunidad de coste y lo que refleja una rentabilidad aceptable.

El análisis económico realizado muestra que el proyecto de implantación de *C. sativa* en la parcela de Mora es financieramente viable en las condiciones planteadas.

7.4.5. Estudio de sensibilidad. Análisis Montecarlo

Al observar que el proyecto, tal y como está planteado, es altamente sensible a cualquier variación, se ha decidido realizar varias simulaciones de tipo Monte Carlo con el fin de analizar la sensibilidad del proyecto frente a la variabilidad de los parámetros más relevantes.

Se plantearon varios escenarios posibles, todos ellos considerando un horizonte de 10 años:

- **Escenario 1: Pesimista (mercado adverso).**
  Rendimiento: 1.000 kg/ha. Precio de venta: 300 €/t (≈ −43 % de beneficio por grano respecto al base). Se aplica un +10 % sobre el total de costes operativos. Resto de supuestos inalterados.

En el escenario 1, el rendimiento se reduce a 1.000 kg/ha y el precio del grano a 300 €/t, con un incremento del 10 % en los costes de explotación. El resultado es un flujo anual negativo de –149.61 €, lo que implica que el proyecto no logra cubrir los costes en ningún ejercicio. El Valor Actual Neto (VAN) calculado a una tasa de descuento del 10 % asciende a –2590.84 €, y la Tasa Interna de Retorno (TIR) no es computable, dado que los flujos de caja permanecen negativos a lo largo de los diez años de horizonte considerado. Estos resultados muestran que, bajo condiciones desfavorables de productividad y precios, el proyecto pierde su viabilidad económica.

- **Escenario 2: Base.**
  Rendimiento: 1.500 kg/ha. Precio: 350 €/t. Coste base. Calculado en los apartados anteriores

El escenario base (2) fue previamente discutido en los apartados anteriores.

- **Escenario 3: Optimista (mercado favorable).**
  Rendimiento: 2.000 kg/ha. Precio: 400 €/t (≈ +52 % de beneficio por grano respecto al base). Costes base. Resto de supuestos inalterados.

En el escenario 3, el rendimiento se incrementa a 2.000 kg/ha y el precio del grano a 400 €/t, sin incrementos en los costes de explotación. El resultado es un flujo anual positivo de 284.84 €, multiplicando prácticamente x10 los beneficios del escenario base. El Valor Actual Neto (VAN) calculado a una tasa de descuento del 10 % asciende a 2485.16 €, y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es de 142%. . Estos resultados muestran que, bajo condiciones favorables de productividad y precios, el proyecto cobra valor.

- **Escenario 4: Cambio positivo en PAC (+15 %).**
  Se incrementa en +15 % la ayuda directa por ha aplicable a cultivos energéticos. Resto de variables como en el escenario base.

En el escenario 4, se plantea un incremento del 15 % en las ayudas directas destinadas a cultivos energéticos dentro de la Política Agraria Común. Como resultado, se obtiene un flujo anual positivo de 28,54 €, lo que representa una mejora respecto al beneficio alcanzado en el escenario base. En términos financieros, el Valor Actual Neto (VAN), calculado con una tasa de descuento del 10 %, asciende a 69,07 €, mientras que la Tasa Interna de Retorno (TIR) se sitúa en un 13,99 %. Estos valores reflejan que, aun tratándose de un impacto económico moderado, un cambio favorable en la política de ayudas contribuye a mejorar la viabilidad del proyecto.

- **Escenario 5: Alquiler para el abonado en lugar de compra.**
  En este escenario se opta por alquilar la abonadora en lugar de realizar la inversión en su compra. El coste de alquiler se establece en 150 €/día, lo que proporcionalmente equivaldría a 18.75 € por hora de uso. Dado el reducido tamaño de la parcela y la anchura de trabajo de este tipo de maquinaria, la labor puede completarse en aproximadamente 1 h por aplicación, de modo que las dos aplicaciones previstas (abonado de fondo y abonado de cobertera) suponen un gasto total de 37,5 €. A ello se añade el coste del operario propio, estimado en 2 h de trabajo a 10 €/h, con un importe final de 20 €. En conjunto, la operación asciende a 57,5 €, lo que representa un incremento del 89 % en el coste de maquinaria, acompañado de una reducción del 29 % en el coste de mano de obra.
  Asimismo, se considera una pérdida del 5 % de la superficie cultivada útil debido a las rodadas de la maquinaria, lo que implica una reducción proporcional del 5 % en todos los beneficios obtenidos.

En el escenario 5, se plantea la posibilidad de alquilar maquinaria para el abonado (concretamente una abonadora centrífuga) en lugar de invertir en la compra de una abonadora manual. Como resultado, se obtiene un flujo anual positivo de 15.31 €, siendo inferior al beneficio del escenario base. Desde el punto de vista financiero, el Valor Actual Neto (VAN), calculado con una tasa de descuento del 10 %, asciende a 144,35 €, debido a que no existe un desembolso inicial y los flujos positivos se acumulan íntegramente en el horizonte de análisis. En cambio, la Tasa Interna de Retorno (TIR) resulta inaplicable, ya que este indicador solo puede calcularse cuando hay un flujo de inversión inicial que recuperar; al eliminarse la inversión, cualquier tasa de descuento mantiene el VAN positivo y la fórmula no converge.

- **Escenario 6: Reducción del coste de oportunidad (CoC = 5 %).**

Se fija la tasa de descuento (coste de oportunidad del capital) en **5 %** para el cálculo de VAN/TIR, manteniendo sin cambios los flujos operativos del escenario base.

En este escenario se plantea una reducción del CoC al 5 %, bajo la hipótesis de que el proyecto presenta un mayor grado de estabilidad y, por tanto, una percepción de menor riesgo por parte de los inversores. En estas condiciones, los valores de flujo anual de caja y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se mantienen sin variaciones respecto al escenario base, dado que los flujos operativos no se modifican. Sin embargo, al aplicarse una tasa de descuento más baja, el Valor Actual Neto (VAN) se incrementa hasta 149,88 €, reflejando el efecto positivo que una menor percepción de riesgo tiene sobre la valoración financiera del proyecto.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, I. M., Nadira, U. A., Bibi, N., Cao, F., He, X., Zhang, G., & Wu, F. (2017). Morpho-physiological and biochemical responses of Camelina sativa (L.) Crantz genotypes under drought stress. Agricultural Water Management, 191, 202–212. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.019

Ahmadzai, H., Tutundjian, S., Dale, D., Brathwaite, R., Lidderr, P., Selvaraju, R., Malhotra, A., Boerger, V., & Elouafi, I. (2022). Marginal lands: potential for agricultural development, food security and poverty reduction. FAO. Recuperado de: http://openknowledge.fao.org/items/4fd2b0b0-9c2f-42ec-bd08-56f88d963f08

Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). (2022). Estadística de IRPF por municipios 2022 (renta media por persona). Recuperado de: https://sede.agenciatributaria.gob.es/AEAT/Contenidos_Comunes/La_Agencia_Tributaria/Estadisticas/Publicaciones/sites/irpfmunicipios/2022/jrubikf714fe1cd4ece6c63e00afc6f53d7084378433fc1.html

Ayuntamiento de Mora. (s. f.). Fiesta del Olivo. Recuperado de: https://www.mora.es/areas/FDO

Balteanu, I., & Viani, F. (2023). La dependencia energética de la Unión Europea y de España. Boletín Económico - Banco de España, 2023(T3), 02. Recuperado de: https://doi.org/10.53479/30252

BBVA. (s. f.). Valor actual neto (VAN). Diccionario económico BBVA. Recuperado de: https://www.bbva.es/diccionario-economico/v/valor-actual-neto-van.html

Berge, J. B., Gouyon, P.-H., & Carbonell, P. (1998). Influence of temperature on primary and lateral root growth of sunflower seedlings. Plant and Soil, 202(1), 37–47. Recuperado de: https://doi.org/10.1023/A:1004341413617

Camelina Company España. (2020). Protocolo agronómico de camelina 2020-2021. Recuperado de: https://www.deagro.es/wp-content/uploads/2020/10/Camelina-2020_21-PROTOCOLO.pdf

Camelina Company España. (2020). Protocolo camelina sativa para su introducción como cultivo de primavera en el Reino Unido. Proyecto UNTWIST – Horizonte 2020.

Recuperado de: https://www.untwist.eu/wp-content/uploads/2025/05/Protocol-in-UK-Espanol.pdf

Camelina Company. (2021). Protocolo Camelina sativa para su introducción como cultivo de primavera en el Reino Unido. Proyecto UNTWIST, Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea (GA 862524). Recuperado de: https://www.camelinacompany.es/

Camelina Company España. (2024). Protocolo agronómico de camelina 2024-2025. Centro de Innovación y Desarrollo, Daimiel (Ciudad Real). Recuperado de: https://www.aprose.es/wp-content/uploads/2024/10/protocolo-camelina_2024.pdf

Ciubota-Rosie, C., Ruiz, J. R., Ramos, M. J., & Pérez, Á. (2013). Biodiesel from Camelina sativa: A comprehensive characterisation. Fuel, 105, 572–577. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.062

Colimon, S., & Kahl, M. (1986). Análisis estratificado en estudios epidemiológicos de observación: ajuste del riesgo relativo. Facultad Nacional de Salud Pública: El escenario para la salud pública desde la ciencia, 9(1-2). Recuperado de: https://www.scielosp.org/article/rsap/1986.v9n1-2/75-81/

Consejo de la Unión Europea. (2024). Paquete de medidas "Objetivo 55" para reducir las emisiones de la UE en un 55 % para 2030. Recuperado de: https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/

Costigan, S. E., Warnasooriya, S. N., Humphries, B. A., & Montgomery, B. L. (2011). Root-localized phytochrome chromophore synthesis is required for photoregulation of root elongation and impacts root sensitivity to jasmonic acid in Arabidopsis. Plant Physiology, 157(3), 1138–1150. Recuperado de: https://doi.org/10.1104/pp.111.184689

Deepika, S., Ankit, A., Sagar, S., & Singh, A. (2020). Dark-induced hormonal regulation of plant growth and development. Frontiers in Plant Science, 11, 581666. Recuperado de: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581666

Dorronsoro Fernández, C. F. (s.f.). Perfil del suelo. Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada. Recuperado de: http://www.edafologia.net/introeda/tema01/perfil4.htm

Eckberg, J. O., Peterson, R. K. D., Bekkerman, A., & Weaver, D. K. (2011). Specialty oilseed crops provide an abundant source of pollen for pollinators and beneficial insects.

BioEnergy Research, 4(1), 50–58. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s12155-010-9111-1

Franklin, K. A. (2008). Shade avoidance. New Phytologist, 179(4), 930–944. Recuperado de: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02507.x

Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA). (s. f.). Nota técnica 4: Ayudas de la PAC. Recuperado de: https://www.fega.gob.es/sites/default/files/inline-files/nota_tecnica_4.pdf

García Adá, R. (1977). Cruciferae - Lepidieae. En T. G. Tutin et al. (Eds.), Flora iberica (Vol. II, pp. 234–237). Recuperado de http://www.floraiberica.es/floraiberica/texto/pdfs/04_072_36_Camelina.pdf

Garrido Valero, M. S. (1993). Interpretación de análisis de suelos. Hojas Divulgadoras, 5/93 HD. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaría General Técnica. Recuperado de: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf

Gebremedhn, Y., Leul, K., Berhanu, A., & Tadesse, B. (2020). Effect of salt stresses on seed germination and early seedling growth of Camelina sativa L. Momona Ethiopian Journal of Science, 12(1), 1–19. Recuperado de: https://doi.org/10.4314/mejs.v12i1.1

Gray, W. M., Östin, A., Sandberg, G., Romano, C. P., & Estelle, M. (1998). High temperature promotes auxin-mediated hypocotyl elongation in Arabidopsis. Proceedings of the National Academy of Sciences, 95(12), 7197–7202. Recuperado de: https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.7197

Gutiérrez López, M., & Albalat Borrás, A. (2013). El cultivo de la camelina en Aragón: Primeras experiencias de su cultivo en el Bajo Aragón (Información Técnica n.º 243). Gobierno de Aragón, Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Recuperado de: http://www.aragon.es

Heydarian, Z., Yu, M., Gruber, M., Coutu, C., Robinson, S. J., & Hegedus, D. D. (2018). Changes in gene expression in Camelina sativa roots and vegetative tissues in response to salinity stress. Scientific Reports, 8, 9804. Recuperado de: https://doi.org/10.1038/s41598-018-28204-4

Hosseini Sanehkoori, F., Pirdashti, H., & Bakhshandeh, E. (2021). Quantifying water stress and temperature effects on Camelina sativa seed germination. Environmental and Experimental Botany, 186, 104450. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104450

Huang, J., Yang, D., Wang, L., Li, H., Wang, C., & Wang, Y. (2019). Leaf fresh weight versus dry weight: Which is better for estimating leaf area of plants? Photosynthetica, 57(4), 1076–1083. Recuperado de: https://doi.org/10.32615/ps.2019.102

Hunsaker, D. J., French, A. N., Clarke, T. R., & El-Shikha, D. M. (2011). Water use, crop coefficients, and irrigation management criteria for camelina production in arid regions. Irrigation Science, 29(1), 27–43. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s00271-010-0213-9

Hunsaker, D. J., French, A. N., & Clarke, T. R. (2011). Camelina growth and yield response to deficit irrigation. Industrial Crops and Products, 34(3), 1371–1380. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.012

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2003). Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja 686 (Turleque). Memoria explicativa. Madrid: IGME. Recuperado de: https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0686.pdf

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2024). Padrón municipal (JAXI-T3, tabla 2902). Recuperado de: https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2902&L=0

International Energy Agency. (2023). Global energy crisis. Recuperado de: https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?language=es

Kim, H.-S., Shin, J.-H., Lee, H.-S., Kim, S., Jang, H.-Y., Kim, E., & Ahn, S.-J. (2022). CsRCI2D enhances high-temperature stress tolerance in Camelina sativa L. through endo-membrane trafficking from the plasma membrane. Plant Science, 320, 111294. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111294

Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. Fuel Processing Technology, 86(10), 1059–1070. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002

Kovar, M., Gesch, R. W., Wells, M. S., & Lenssen, A. W. (2023). Relay-cropping camelina with soybean in the U.S. Midwest: Productivity and environmental impacts. Agronomy Journal, 115(1), 111–128. Recuperado de: https://doi.org/10.1002/agj2.21210

Kristensen, J. A., Balstrøm, T., Jones, R. J. A., Jones, A., Montanarella, L., Panagos, P., & Breuning-Madsen, H. (2019). Development of a harmonised soil profile analytical database for Europe: A resource for supporting regional soil management. SOIL, 5(2), 289–301. Recuperado de: https://doi.org/10.5194/soil-5-289-2019

Kurasiak-Popowska, D., Graczyk, M., Przybylska-Balcerek, A., & Stuper-Szablewska, K. (2021). Influence of variety and weather conditions on fatty acid composition of winter and spring Camelina sativa varieties in Poland. European Food Research and Technology, 247(3), 465–473. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s00217-020-03639-0

Lin, D., Xia, J., & Wan, S. (2010). Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: A meta-analysis. New Phytologist, 188(1), 187–198. Recuperado de: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03347.x

Linares, P. (2018). La transición energética. Ambienta, 125, 20–31. Recuperado de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM/PDF_AM_Ambienta_2018_125_20_31.pdf

Liu, J., & van Iersel, M. W. (2021). Photosynthetic physiology of blue, green, and red light: Light intensity effects and underlying mechanisms. Frontiers in Plant Science, 12, 619987. Recuperado de: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.619987

Lovett, J. V., & Jackson, H. F. (1980). Allelopathic activity of Camelina sativa (L.) Crantz in relation to its phyllosphere bacteria. New Phytologist, 86(3), 273–278. Recuperado de: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb00788.x

Mauri Ablanque, P. V., Plaza Benito, A., Hernando, G., & Capuano, A. (2018). Methodological comparison of different camelina cultivation cycles: species of interest in Spain. 22nd International Congress on Project Management and Engineering, Madrid. AEIPRO. Recuperado de: http://dspace.aeipro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1644/AT04-021_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (1993). Germinación, latencia y dormición de las semillas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado de: https://www.mapa.gob.es/es/

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2025). Índices y precios pagados agrarios. Abril 2025. Gobierno de España. Recuperado de: https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/estadisticas/temas/estadisticas-agrarias/1.economicas/indices-y-precios-agrarios/indices-y-precios-pagados-agrarios/indicesypreciospagadosagrariospublicacion2025abril.pdf

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2025). *Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera: Enero 2025*. Secretaría General de Transporte Terrestre. Recuperado de: https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/transporte-terrestre/actividades-servicios/observatorios-costes-transporte-mercancias/2025/observatorio-costes-mercancias_2025-01-enero.pdf

Mostaza-Colado, D., Mauri Ablanque, P. V., & Capuano, A. (2021). Variedades de camelina mejor adaptadas para el cultivo en Madrid (Proyecto CAMEVAR). IMIDRA – Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario; Camelina Company España; ASAJA Madrid. Recuperado de: http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2020/CT%202020/5414.pdf

Neupane, D., Solomon, J. K. Q., Billman, E., Johnston, S., Kirkpatrick, M., & Beattie, G. A. (2022). Camelina (Camelina sativa): An emerging oilseed crop with potential for biofuel and industrial applications. Plants, 11(6), 772. Recuperado de: https://doi.org/10.3390/plants11060772

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2001). Trigo regado: Manejo del cultivo. FAO. https://www.fao.org/4/x8234s/x8234s0b.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2005). Glosario de términos sobre humedad del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de: https://www.fao.org/4/y4690s/y4690s02.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (s.f.). Propiedades físicas del suelo – Disponibilidad del agua en el suelo. Portal de Suelos de la

FAO. Recuperado de: https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/

Ostertagová, E., Ostertag, O., & Kováč, J. (2014). Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. Applied Mechanics and Materials, 611, 115–120. Recuperado de: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.611.115

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de la Unión Europea, L 328/82. Recuperado de: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001

Pavlista, A. D., Hergert, G. W., Margheim, J. F., & Isbell, T. A. (2016). Growth of spring camelina (Camelina sativa) under deficit irrigation in western Nebraska. Industrial Crops and Products, 83, 118–123. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.032

Sage. (2023, 14 de noviembre). Tasa Interna de Retorno (TIR): Qué es y cómo se calcula. Sage España. Recuperado de: https://www.sage.com/es-es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/

Seo, M., Nambara, E., Choi, G., & Yamaguchi, S. (2009). Gibberellins and light-stimulated seed germination. Journal of Plant Biology, 52(2), 124–130. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s12374-009-9018-5

Séguin-Swartz, G., Eynck, C., Gugel, R. K., Strelkov, S. E., Olivier, C. Y., & Li, J. L. (2009). Diseases of Camelina sativa (false flax). Canadian Journal of Plant Science, 89(4), 837–852. Recuperado de: https://doi.org/10.4141/CJPS09006

Silva-Navas, J., Moreno-Risueno, M. A., Manzano, C., Téllez-Robledo, B., Navarro-Neila, S., Carrasco, V., & del Pozo, J. C. (2015). D-Root: A system to cultivate plants with the root in darkness or under different light conditions. The Plant Journal, 84(2), 244–255. Recuperado de: https://doi.org/10.1111/tpj.12990

Simon, E. W. (1976). The low temperature limit for seed germination. New Phytologist, 77(2), 301–311. Recuperado de: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1976.tb01519.x

UNIR. (2024). Análisis DAFO: Qué es, cómo hacerlo y ejemplos. UNIR Revista. Recuperado de: https://www.unir.net/revista/empresa/analisis-dafo/

USDA. (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf

Velasco Molina, M. (2018). Muestreo de suelos: técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos. En ResearchGate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/325478338_Muestreo_de_suelos_tecnicas_de_laboratorio_e_interpretacion_de_analisis_de_suelos

Wang, J., & Shang, Y. (2020). Hypocotyl elongation of Brassica rapa is regulated by high temperature through changes in cell wall properties. PeerJ, 8, e9106. Recuperado de: https://doi.org/10.7717/peerj.9106

Yan, A., & Chen, Z. (2020). The control of seed dormancy and germination by temperature, light and nitrate. The Botanical Review, 86, 39–75. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s12229-020-09220-4

Zanetti, F., Eynck, C., Christou, M., Krzyżaniak, M., Righini, D., Alexopoulou, E., & Monti, A. (2017). Agronomic performance and seed quality attributes of Camelina sativa (L. Crantz) in multi-environment trials across Europe and Canada. Industrial Crops and Products, 107, 602–608. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.012

Zanetti, F., Peroni, P., Pagani, E., von Cossel, M., Greiner, B. E., Krzyżaniak, M., Stolarski, M. J., Lewandowski, I., Alexopoulou, E., Stefanoni, W., Pari, L., Facciolla, E., & Monti, A. (2013). The opportunities and potential of camelina in marginal land in Europe. Industrial Crops and Products, 50, 729–736. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.013

IX. ANEJOS

Anejo I: Análisis estadístico

Anejo II: Situación y localización de la parcela

Anejo III: Caracterización edafoclimática de la zona de estudio

Anejo IV: Programa y Estudio de maquinaria agraria

Anejo V: Evaluación financiera del proyecto

Anejo VI: Mapas y planos

Trabajo de Fin de Grado

Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

Anejo I:

Análisis estadístico

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ingeniería Agroambiental

El presente anejo reúne las pruebas estadísticas realizadas sobre las variables estudiadas en los tres ensayos correspondientes a este trabajo: longitud de radícula, longitud de vástago, peso fresco, peso seco y número de raíces secundarias.

Los datos fueron analizados mediante el software RStudio (v. 4.4.2).

Inicialmente, se comprobaron los supuestos necesarios para poder realizar la prueba estadística ANOVA (normalidad y homogeneidad). En caso de que resultasen positivos, se procedió a aplicar la prueba paramétrica nombrada, seguida de la prueba post hoc Tukey HSD. En caso contrario, se comprobó la posible presencia de datos anómalos que distorsionasen el análisis y en función de los resultados se decidió aplicar una prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis y prueba de Dunn) o una prueba paramétrica con los datos modificados.

Dado que el trabajo analiza la interacción entre dos factores dependiendo del ensayo (variedad y temperatura/ variedad y condición de luz/ variedad/estrés), se optó por realizar un análisis estratificado. El análisis estratificado permite analizar por separado el efecto de cada factor manteniendo constante el otro (Colimon & Kahl, 1986).

En primer lugar, se estudió el efecto del tratamiento dentro de cada una de las variedades. Posteriormente, se analizó el efecto de la variedad dentro de cada tratamiento.

- COMPROBACIÓN DE SUPUESTOS PREVIOS AL ANOVA:

Homogeneidad (Prueba de Levene):

La homogeneidad de varianzas se verificó mediante la prueba de Levene, empleando la mediana como referencia y estableciendo un nivel de significancia de 0.05. En la Tabla 8 se presenta un ejemplo ilustrativo correspondiente al análisis de la longitud de radícula (LR) de la variedad 1 bajo diferentes condiciones térmicas (Ensayo 1).

H0: No existen diferencias significativas entre las varianzas de los distintos niveles del tratamiento para la variable analizada.

Tabla 8. Ejemplo ilustrativo de la prueba de Levene para la variable LR del ensayo 1

ENSAYO 1	
	Longitud Radícula (LR)
g.l.	
Tratamiento	6
Residual	19
F-value	36.73
P-value	1.83e-09
Significancia	***

Nota: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05; NS: No significativo

En este caso, el valor de p (1.83e-09) resultó muy inferior al umbral de significancia (α = 0.05). Por tanto, la probabilidad de rechazar erróneamente la hipótesis nula es muy baja, lo que lleva a concluir que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas para la variable longitud de radícula en la variedad 1.

Normalidad (Prueba de Shapiro-Wilk):

Para comprobar la distribución que presentan los datos y verificar su normalidad se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a los residuos de los modelos ANOVA. Se estableció un nivel de significancia de 0.05. En la Tabla 9 se presenta un ejemplo ilustrativo correspondiente a la longitud de radícula (LR) de la variedad 1 bajo diferentes condiciones térmicas (Ensayo 1).

H0: Los residuos del modelo ANOVA ajustado para la variable siguen una distribución normal.

Tabla 9. Ejemplo ilustrativo de la prueba de Shapiro-Wilk de la variable LR del ensayo 1

	ENSAYO 1						
	5ºC	*10ºC*	*15ºC*	*20ºC*	*25ºC*	*30/20ºC*	*30ºC*
P-value	0.2478	0.9911	0.315	0.5138	0.8985	0.07623	0.05045
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Nota: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05; NS: No significativo.

Todas las temperaturas presentaron un valor p superior al valor umbral (α=0.05), por lo tanto, la probabilidad de aceptar equivocadamente H0 es baja, por lo que se considera que la variable cumple con el supuesto de normalidad para todos los tratamientos térmicos.

El mismo análisis se aplicó para el resto de las variables, y de forma similar para estudiar el efecto de la variedad dentro de cada tratamiento.

- ELECCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS: ANOVA O KRUSKAL-WALLIS

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para cada una de las variables medidas en cada ensayo, se seleccionó el tipo de análisis estadístico más adecuado.

En los casos en los que se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA). Cuando el valor de p resultó inferior al umbral de significancia (α = 0.05), se concluyó la existencia de diferencias significativas entre tratamientos. Posteriormente, se llevó a cabo la prueba post hoc de Tukey HSD con el fin de identificar los pares de grupos responsables de dichas diferencias, representando los resultados mediante letras asignadas a cada grupo. En la Tabla 10 y la Figura 21 se muestra el ejemplo

ilustrativo con el análisis del efecto de los tratamientos dentro de la variedad 1 para la variable de peso fresco (Ensayo 3).

H0: los niveles de los factores no influyen significativamente en la variable analizada.

Tabla 10. Ejemplo ilustrativo del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al peso fresco (PF) en el ensayo 3

ENSAYO 3	
ANOVA: variedad	
	Peso Seco (PS)
g.l. (d.f.)	2
Sum Sq	1.297e-05
Mean Sq	6.487-e06
F-value	20.93
P-value	0.00111
Significancia	**

Nota: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05; NS: No significativo.

Tras detectar diferencias significativas entre los niveles del factor mediante el análisis de varianza (ANOVA), se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con el objetivo de identificar entre qué grupos concretos existían dichas diferencias.

EO-Control: p value = 0.0010282 (**)

ES-Control: p value = 0.1674219

ES-EO: p value = 0.0113900 (*)

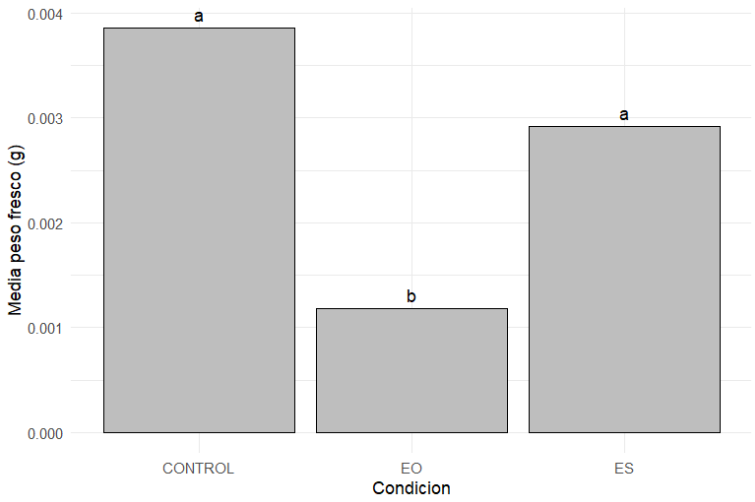


Figura 21. Peso fresco medio (g) bajo las condiciones Control, EO y ES. Letras distintas indican diferencias significativas (Test Tukey).

En contraste, cuando alguno de los supuestos no se cumplió, se optó por aplicar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, tras verificar la ausencia de valores anormales que distorsiones el análisis posiblemente ocasionados por errores experimentales/instrumentales, complementada con un análisis post hoc de Dunn (con corrección de Bonferroni) para determinar entre qué grupos se encontraban las diferencias significativas. En la Tabla 11 y la Figura 22 se muestra el ejemplo ilustrativo con el análisis del efecto de la variedad para la condición control en la variable peso seco (Ensayo 3).

H0: los niveles de los factores no influyen significativamente en la variable analizada.

Tabla 11. Ejemplo ilustrativo de la prueba de Kruskal-Wallis para la variable de Peso seco (Ensayo 3)

ENSAYO 3	
Kruskal-Wallis: Condición	
	Peso Seco
P-value	0.03461
Significancia	*

Nota: ***p < 0.001; **p < 0.01; *p < 0.05; NS: No significativo.

Tras confirmar mediante la prueba de Kruskal-Wallis que existían diferencias estadísticamente significativas entre los variedades ($p < 0,05$), se procedió a realizar la prueba de Dunn para identificar entre qué pares de grupos se encontraban dichas diferencias.

V1-V2: p value= 0.22696666

V1-V3: p value= 0.03086262 (*)

V2-V3: p value= 1.00000000

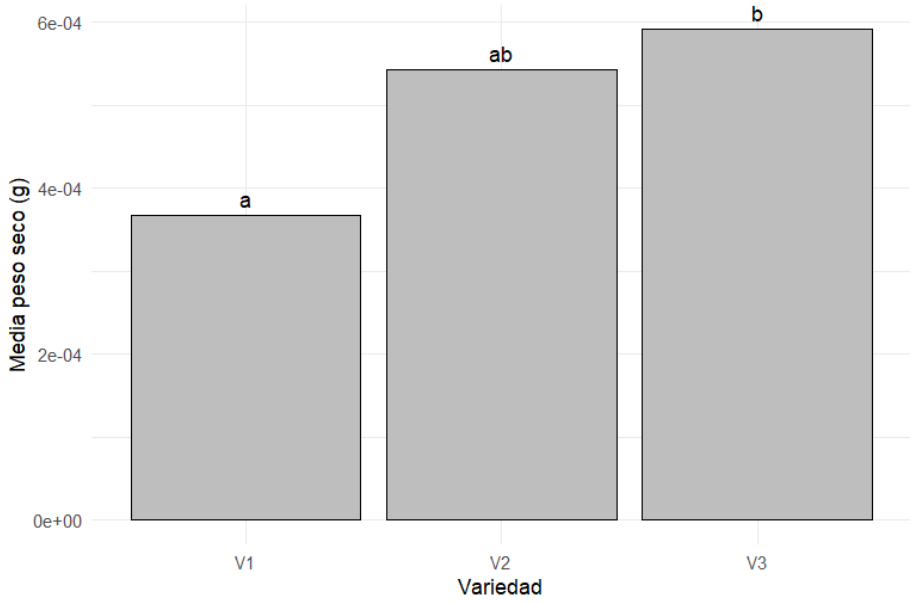


Figura 22. Peso seco medio (g) bajo las condiciones V1, V2 y V3. Letras distintas indican diferencias significativas (Test Dunn)

En todos los ensayos se siguió exactamente la misma metodología, adaptada a las variables y factores de cada caso, por lo que los resultados aquí expuestos son representativos del procedimiento aplicado en todo el estudio.

Trabajo de Fin de Grado

Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

Anejo II:

Situación y localización de la parcela

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ingeniería Agroambiental

Análisis estratégico de la localización del cultivo

Para la implantación experimental del cultivo de *C. sativa*, se optó por realizar una búsqueda estratégica de la localización más adecuada, analizando desde una perspectiva metodológica de mayor a menor escala, desde el ámbito nacional hasta la identificación de la propia parcela. En primer lugar, se acotó el territorio a nivel nacional, seleccionando España como ámbito de actuación por cuestiones de viabilidad operativa, acceso, disponibilidad de datos, y cercanía geográfica para la gestión del proyecto.

A continuación, se llevó a cabo un análisis multianual de la distribución del cultivo de camelina a partir de los datos estadísticos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2017–2023). En la Figura 23 se presenta la evolución de la superficie cultivada a nivel nacional, diferenciando entre régimen de secano y de regadío y se confirma una clara predominancia del cultivo en secano.

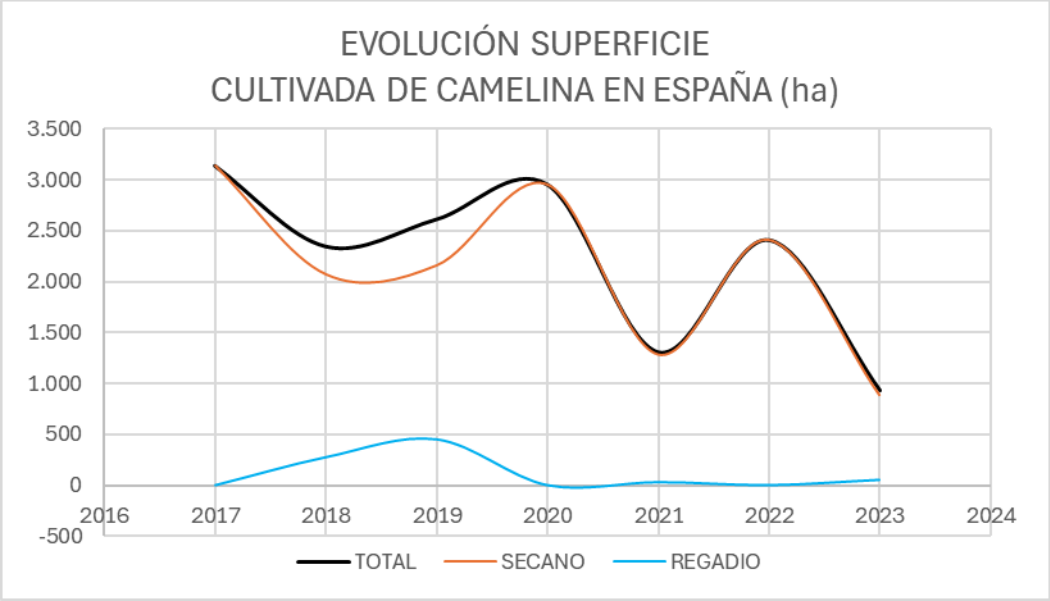


Figura 23. Evolución de la superficie cultivada de Camelina sativa en España
Fuente: elaboración propia a partir de datos del MAPA (2017–2023).

Al observar la evolución, se aprecia que durante los primeros años analizados (2017–2019), la superficie en régimen de regadío mostró una tendencia creciente, lo que podría interpretarse como una apuesta inicial por testar el rendimiento del cultivo bajo condiciones controladas de humedad. Sin embargo, a partir de 2020, el cultivo en regadío se redujo notablemente y se mantuvo en valores muy bajos frente al secano, que pasó a representar la práctica totalidad de la superficie nacional.

Esta dinámica podría estar relacionada con varios factores. Una posible explicación es que el cultivo de camelina no resulte suficientemente rentable bajo regadío, dado su uso principalmente energético y su posicionamiento como cultivo en tierras marginales. Otra hipótesis es que el

secano haya demostrado ser más competitivo en términos de costes y adaptabilidad, lo cual justificaría su consolidación como régimen principal.

Además de la evolución general del cultivo, se analizó su distribución territorial para identificar aquellas zonas con mayor continuidad y superficie sembrada de *C. sativa*. En las Figura 24 y 25 se muestra la evolución por comunidades autónomas y provincias entre los años 2017 y 2023. Destacan especialmente Castilla-La Mancha, Castilla y León y Aragón como regiones con una mayor implantación histórica del cultivo.

En términos provinciales, Toledo y Cuenca sobresalen por la amplitud de superficie cultivada en varios de los años analizados, lo que indica una cierta estabilidad en su manejo y una potencial consolidación del cultivo en esas zonas. Esta información fue determinante para acotar las posibles ubicaciones del presente proyecto.

Una vez seleccionada la provincia de Toledo como zona objetivo, se procedió a la búsqueda de una parcela concreta que cumpliera con una serie de criterios técnicos, agronómicos y logísticos. Dado el reducido margen temporal disponible para la elaboración y defensa del Trabajo Fin de Grado, se estableció como requisito que la parcela contara con un análisis edafológico previo, evitando así la necesidad de realizar una calicata, muestreo y análisis fisicoquímico completo durante el desarrollo del trabajo.

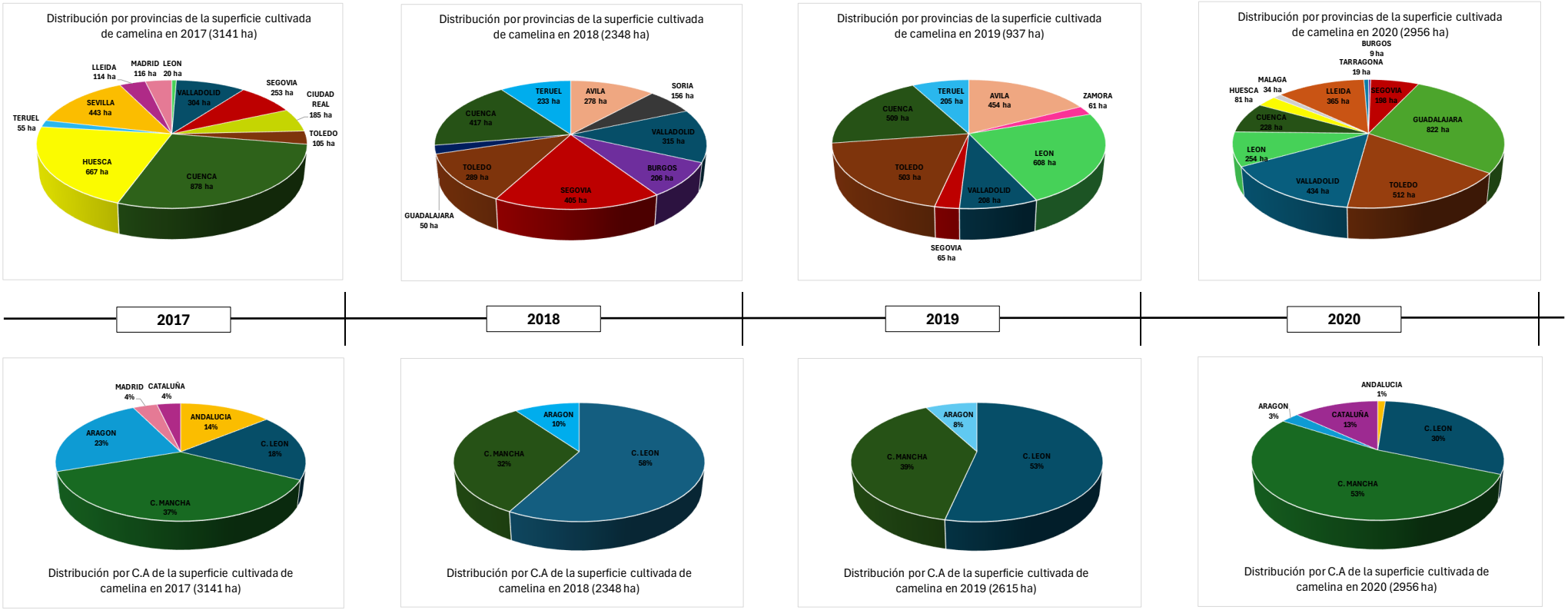
En este contexto, se identificó el municipio de Mora (Toledo) como ubicación idónea. La elección se fundamenta en tres aspectos clave:

(i) Su localización dentro de una provincia con presencia histórica del cultivo.

(ii) La disponibilidad de un perfil edafológico detallado (S042), registrado por la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo y actualizado por Sara y Gallardo en 2014.

(iii) El hecho de tratarse de una zona marginal que no compite con cultivos alimentarios, compatible con los principios de sostenibilidad para el presente proyecto.

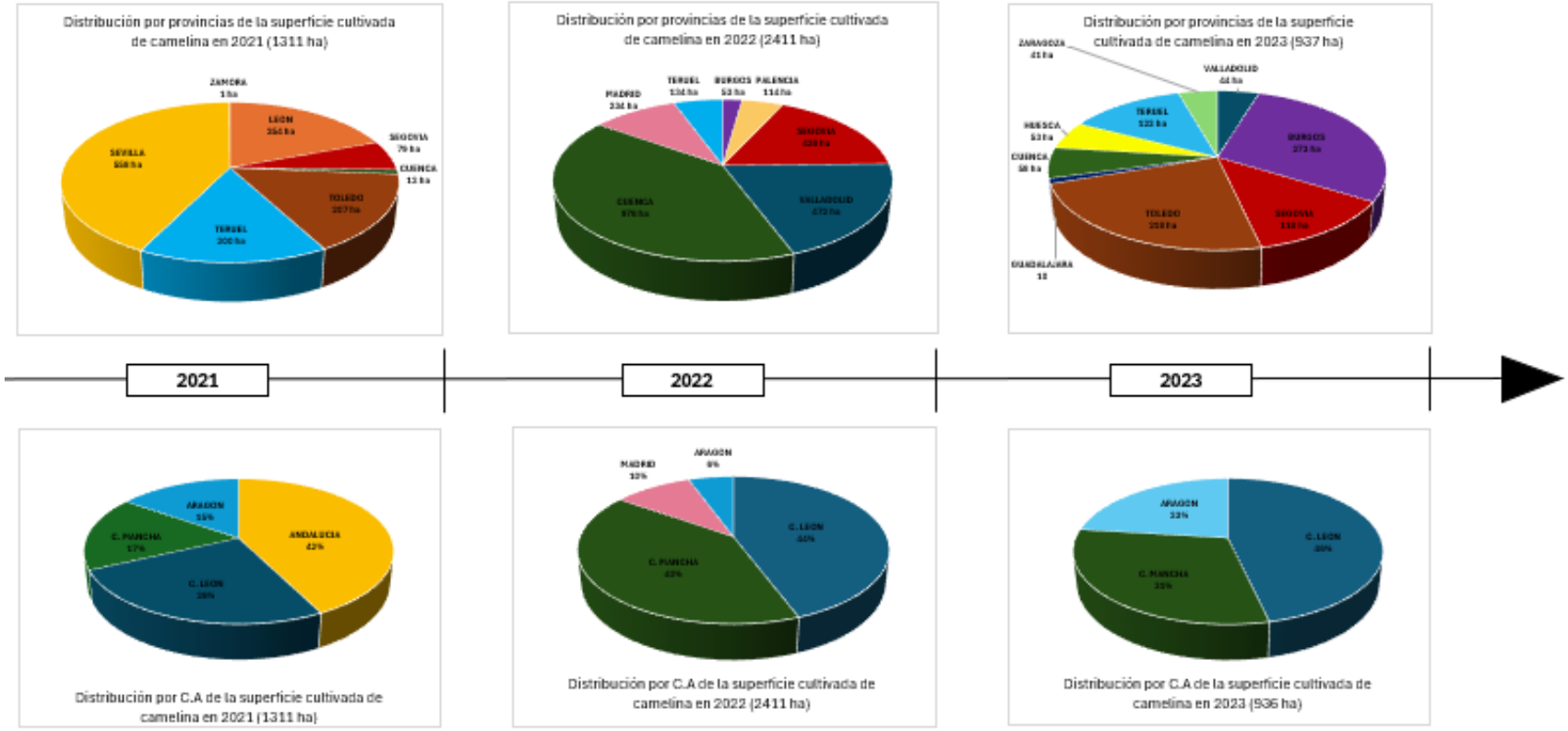
DISTRIBUCIÓN HISTÓRICA DE *CAMELINA SATIVA* POR PROVINCIAS (2017-2023)



DISTRIBUCIÓN HISTÓRICA DE *CAMELINA SATIVA* POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS (2017-2023)

Figura 24. Distribución de los cultivos de Camelina sativa por España históricamente
Fuente: elaboración propia a partir de los datos del MAPA (2017-2023)

DISTRIBUCIÓN HISTÓRICA DE *CAMELINA SATIVA* POR PROVINCIAS (2017-2023)



DISTRIBUCIÓN HISTÓRICA DE *CAMELINA SATIVA* POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS (2017-2023)

Figura 25. Distribución de los cultivos de Camelina sativa por España históricamente
Fuente: elaboración propia a partir de los datos del MAPA (2017-2023)

En definitiva, la selección de esta parcela en el término municipal de Mora responde a un proceso de evaluación técnico y estratégico en el que se han considerado tanto los factores históricos y espaciales de distribución del cultivo, como las condiciones edafológicas y de uso agrícola existentes. A partir de este punto, se procede a detallar las características concretas de la parcela seleccionada, incluyendo su localización catastral y las vías de acceso que definen su conectividad y viabilidad logística.

1.1. Catastro y redes de comunicación

La parcela destinada para el cultivo experimental de *C. sativa* se encuentra en el término municipal de Mora, en la provincia de Toledo. Según los datos del Catastro corresponde con la parcela 15 del polígono 23, cuya referencia catastral es 45107A023000150000MK. La finca tiene una superficie total de 1,1689 hectáreas y está clasificada como pasto arbustivo. Este tipo de uso del suelo se asocia frecuentemente a zonas de baja productividad agrícola o con limitaciones físicas, por lo que puede considerarse un indicio de marginalidad en términos de aprovechamiento agrícola, lo cual lo hace adecuado para la implantación de cultivos no alimentarios como la camelina.

Los datos del SIGPAC indican que la parcela se sitúa a una altitud aproximada de 783 metros y presenta una pendiente media del 20,6 %, valores que, si bien limitan ciertos cultivos tradicionales, son compatibles con especies rústicas de bajo requerimiento hídrico. Se encuentra ubicada al suroeste del núcleo urbano de Mora y dispone de acceso mediante caminos rurales transitables, entre ellos la Cañada de la Mora, camino que conecta con la carretera TO-2031 y, a escasos kilómetros, con la CM-410. Estas condiciones hacen viable el transporte de insumos y la circulación de maquinaria agrícola.

En la Figura 26 se muestra un mapa de localización multiescala, donde se puede apreciar la ubicación de la parcela en los contextos regional, provincial y local, así como su delimitación sobre ortoimagen reciente.

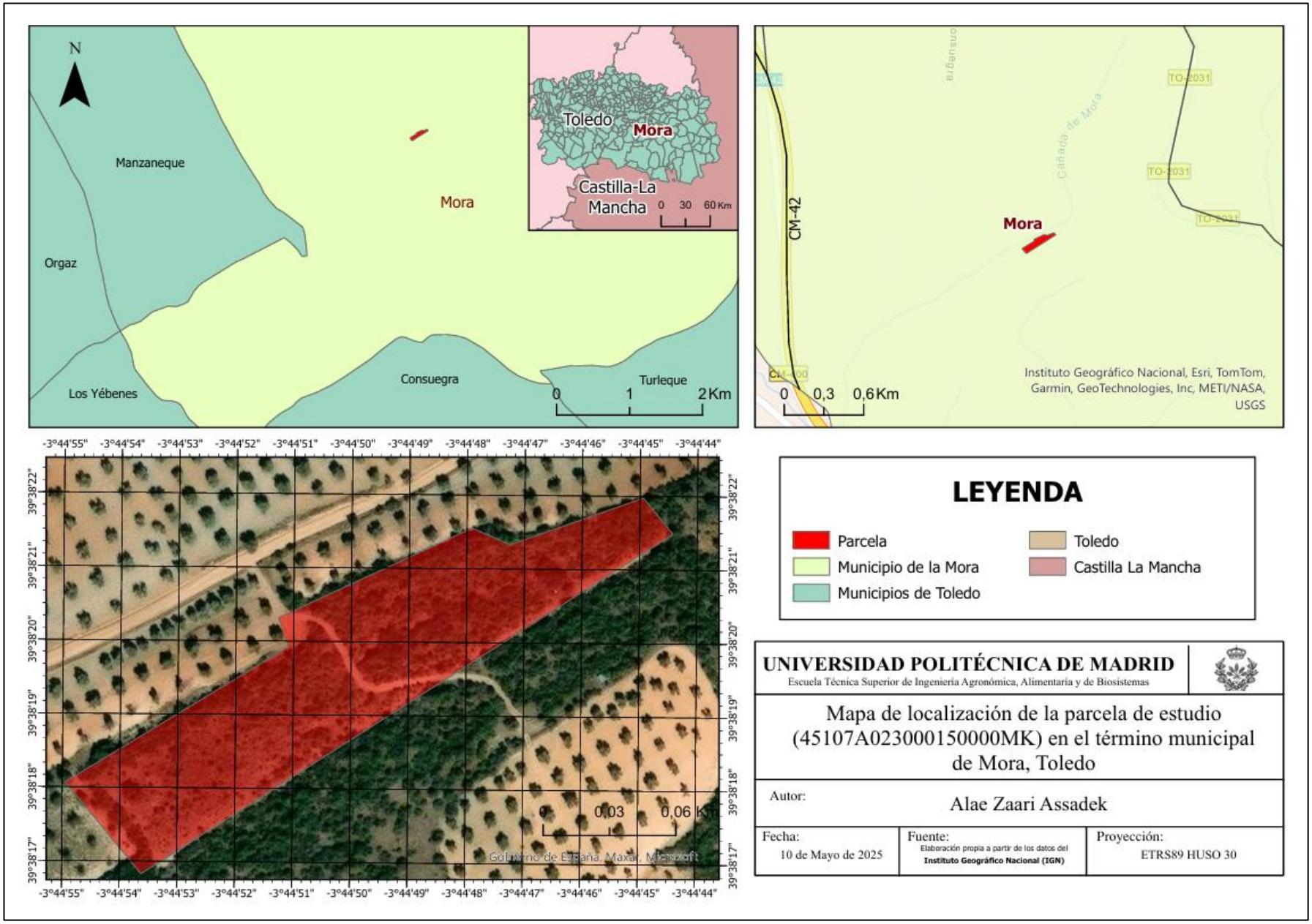


Figura 26. Mapa de localización de la parcela experimental para el cultivo de Camelina Sativa

1.2. Usos y características del terreno

Según la cartografía del Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España (SIOSE), la parcela se encuentra clasificada como bosque mixto, categoría que engloba zonas cubiertas por vegetación leñosa diversa, incluyendo matorral alto, formaciones aclaradas o áreas de transición forestal. No obstante, esta clasificación contrasta con la información catastral y la observación directa mediante ortofotografía, que reflejan un uso real correspondiente a pasto arbustivo, sin cobertura forestal densa ni aprovechamiento forestal activo. Esta discrepancia podría deberse a la fecha y escala de la fuente.

En cualquier caso, el terreno presenta características compatibles con el cultivo de camelina: escaso valor agronómico, vegetación leñosa dispersa y no aprovechable y ausencia de cultivos alimentarios recientes. En la Figura 27 se presenta un mapa combinado que representa, a la izquierda, la ocupación del suelo según la cartografía del Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España (SIOSE), y a la derecha, la pendiente del terreno obtenida a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

En cuanto a la pendiente, el análisis muestra que una parte considerable de la parcela se sitúa en rangos superiores al 20 %, e incluso mayores al 30 % en los extremos. Estos valores representan una limitación clara para el uso de maquinaria agrícola convencional, y podrían afectar el establecimiento de cultivos exigentes. Sin embargo, para especies de manejo extensivo y baja exigencia hídrica, como la camelina, estas condiciones no resultan necesariamente restrictivas (Zannetti, 2024). De hecho, este tipo de terrenos se alinea con los objetivos de aprovechamiento de tierras marginales.

El análisis conjunto de la ocupación del suelo y la pendiente confirma que la parcela seleccionada presenta características propias de un terreno marginal, con limitaciones agronómicas importantes para cultivos convencionales intensivos. La clasificación como pasto arbustivo, la cobertura leñosa dispersa y la elevada pendiente en varias zonas refuerzan su idoneidad para la implantación de un cultivo energético de bajo requerimiento como *C. sativa*, en línea con los criterios de sostenibilidad establecidos para tierras no competitivas con la producción alimentaria.

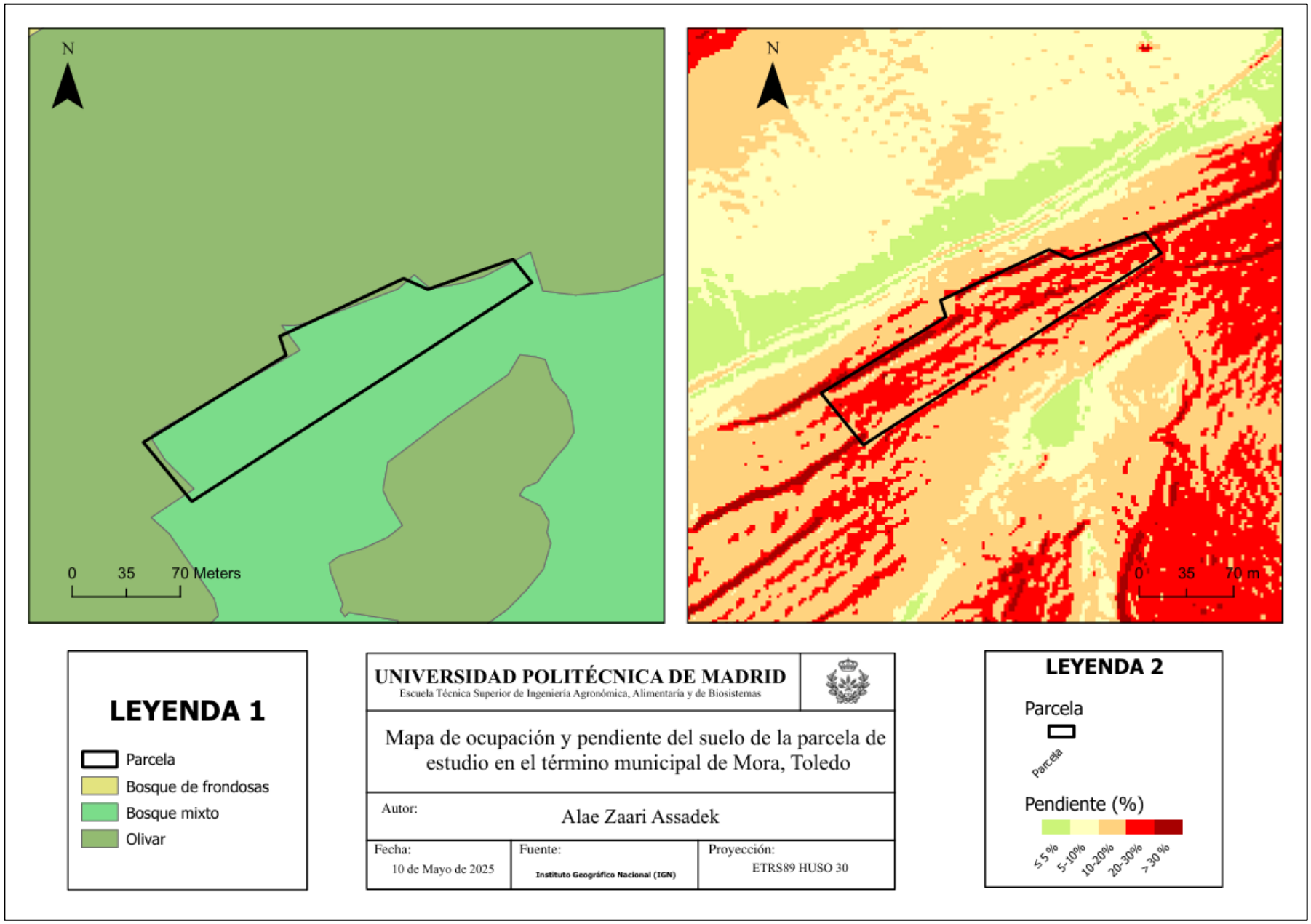


Figura 27. Mapa de ocupación y pendiente de la parcela experimental para el cultivo de Camelina sativa

1.3. Análisis de teledetección

Con el objetivo de reforzar la caracterización agroambiental de la parcela seleccionada, se ha llevado a cabo un análisis complementario mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección. Estas técnicas permiten observar de forma remota y objetiva la dinámica de la superficie terrestre, aportando información clave sobre la cobertura vegetal, la actividad agrícola y las condiciones del entorno sin necesidad de intervención directa en campo.

En este apartado se presenta, en primer lugar, una visualización multitemporal de imágenes satelitales, aplicando el índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a partir de imágenes Sentinel-2, con el fin de evaluar la presencia o ausencia de actividad agrícola reciente en la parcela, así como analizar la vitalidad de la cobertura vegetal en primavera, periodo clave para el desarrollo de cultivos en la región. Este índice permite identificar diferencias en el vigor vegetativo, lo cual resulta útil para confirmar el carácter marginal, extensivo o no productivo de la finca.

En la Figura 28 se muestra la evolución espacial del NDVI en la parcela y su entorno durante los tres años analizados (2023, 2024 Y 2025). En todos los casos, los valores predominantes dentro del recinto oscilan entre 0,10 y 0,25, correspondientes a una cobertura vegetal escasa, propia de matorrales, pasto arbustivo o vegetación espontánea. En ningún año se alcanzan valores superiores a 0,40, lo que indica la ausencia de vegetación densa o cultivos vigorosos en activo durante la primavera.

La estabilidad de los valores bajos de NDVI a lo largo de los tres años, sin aumentos significativos ni cambios abruptos en la distribución espacial, permite inferir que la parcela no ha estado sujeta a rotaciones agrícolas recientes ni a procesos de transformación en su uso del suelo. Este comportamiento es coherente con la clasificación catastral como pasto arbustivo y con las observaciones previas sobre la pendiente y ocupación del terreno. En consecuencia, el análisis multitemporal del NDVI respalda la caracterización de la finca como un espacio de bajo valor productivo, sin presión agrícola activa, adecuado para la implantación experimental de *C. sativa* como cultivo no alimentario en régimen extensivo.

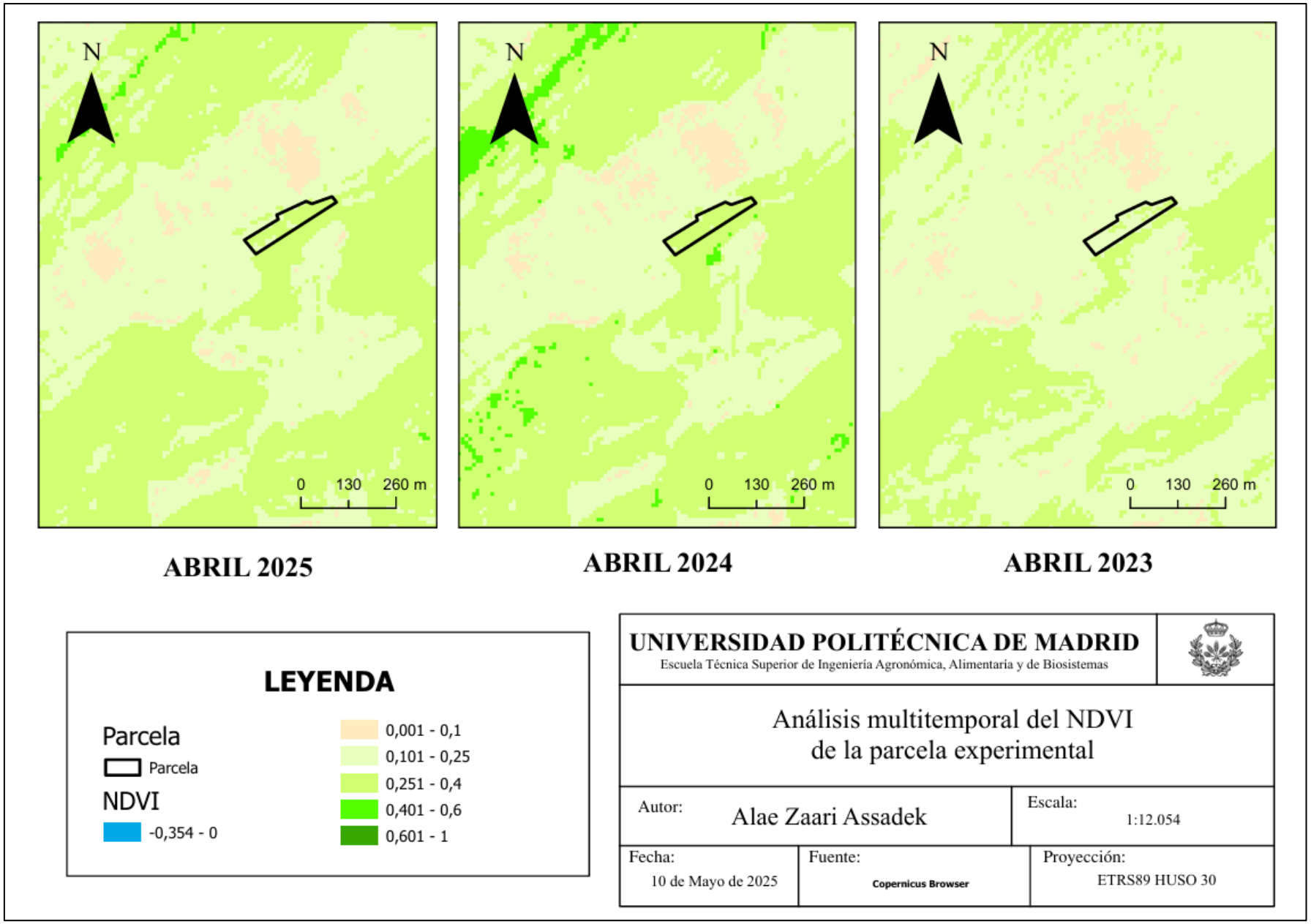


Figura 28. Análisis del NDVI de la parcela durante el mes de abril de los años 2023, 2024 y 2025

1.4. Conclusiones

El proceso de localización y caracterización de la parcela destinada al cultivo experimental de *C. sativa* ha seguido un enfoque progresivo, desde la selección territorial basada en criterios estadísticos y agronómicos hasta el análisis detallado de las condiciones específicas del terreno. La parcela, situada en el término municipal de Mora (Toledo), presenta un uso clasificado como pasto arbustivo, pendiente elevada y ausencia de actividad agrícola reciente, condiciones que refuerzan su carácter marginal.

El conjunto de herramientas aplicadas (catastro, cartografía temática, modelos digitales de elevación y análisis de teledetección multitemporal) ha permitido validar su idoneidad para el establecimiento de un cultivo no alimentario como *C. sativa*, minimizando los conflictos con usos agrícolas convencionales y alineándose con los principios de sostenibilidad y aprovechamiento de tierras de bajo valor productivo. Este anejo constituye, por tanto, la base espacial y técnica sobre la que se sustenta el diseño del cultivo experimental propuesto.

Trabajo de Fin de Grado

Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

Anejo III:

Caracterización edafoclimática de la zona de estudio

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ingeniería Agroambiental

El presente anejo desarrolla el análisis climático y edafológico de la parcela, con el objetivo de caracterizar las condiciones generales que influyen posteriormente en el diseño, implantación y manejo del cultivo. Este análisis resulta esencial para evaluar la viabilidad del proyecto, anticipar posibles limitaciones y establecer estrategias de manejo adaptadas.

El estudio climático se ha realizado a partir de los registros de una estación agroclimática representativa del municipio de Mora, mientras que la caracterización edáfica se ha basado en un perfil de suelo documentado dentro de la parcela.

1. Estudio climático:

a. Localización de la estación climática y fuente de datos:

El estudio climático se basa en los registros de una estación agroclimática representativa, obtenidos del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), gestionado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Esta plataforma permitió acceder a una serie temporal continua correspondiente a la estación agroclimática de Mora (código TO12), abarcando el periodo comprendido entre enero de 2008 y diciembre de 2024.

La elección de esta estación se fundamenta en su proximidad geográfica, al encontrarse a menos de 10 km de la parcela experimental, ambas dentro del término municipal de Mora (Toledo), y en la representatividad climática de sus datos. Entre los factores que refuerzan esta representatividad se encuentra la diferencia altitudinal inferior a 50 metros y la ausencia de barreras geográficas relevantes entre ambas ubicaciones. Dada la continuidad temporal de la serie y la diversidad de variables disponibles (temperatura, precipitación, radiación, evapotranspiración…), esta estación se considera adecuada para el análisis climático del presente estudio.

En la Tabla 12. se reflejan los datos geográficos de la estación climatológica.

Comunidad autónoma	Castilla La Mancha
Provincia	Toledo
Municipio	Mora
Cuenca	Tajo
Comarca	La Mancha
Paraje	Nevado
Latitud	39° 39' 52.9" N
Longitud	3° 46' 21.7" O
Altitud (m)	734
Coordinadas UTM (Km)	X: 433719 Y:4390830
Huso	30 N

Tabla 12. Datos geográficos de la estación

b. Análisis conjunto de temperatura y precipitación: diagrama ombrotérmico

Aunque *C. sativa* se caracteriza por su rusticidad y por una notable tolerancia a condiciones térmicas y hídricas limitantes, la temperatura y la precipitación siguen siendo variables clave para tener en cuenta a la hora de planificar el ciclo del cultivo. En general, estos dos factores suelen condicionar de forma directa el momento óptimo de siembra, la emergencia y el desarrollo de la mayoría de las especies cultivadas.

Para representar de forma integrada su comportamiento mensual, se ha elaborado un diagrama ombrotérmico, que se muestra en la Figura 29, siguiendo el método de Gaussen, que permite identificar visualmente los meses secos, definidos como aquellos en los que la temperatura media mensual supera a la mitad de la precipitación (P/2).

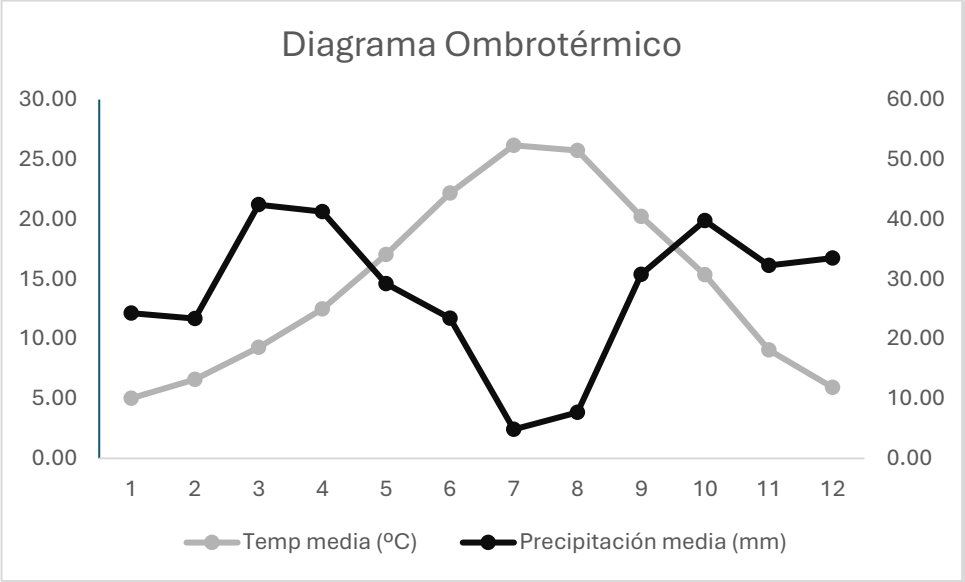


Figura 29. Diagrama ombrotérmico del municipio de Mora (2008–2024). Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAR (MAPA, 2024).

El gráfico muestra un comportamiento climático característico del clima mediterráneo, con inviernos húmedos y veranos secos. Se observa que los meses secos, según la definición anterior, se extienden desde finales de abril hasta mediados de septiembre, coincidiendo con el periodo de máximas temperaturas y mínima pluviometría. Este patrón estacional se analiza con mayor detalle en los apartados siguientes, donde se examinan las variables térmicas y pluviométricas por separado.

Esta interpretación gráfica coincide con la clasificación climática de Papadakis asignada al municipio de Mora por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2024), que lo define como un clima mediterráneo templado fresco, con inviernos algo fríos (Av), veranos moderadamente cálidos (M) y un régimen de humedad medio (Me). Esta tipología refuerza la idea de una marcada estacionalidad térmica y una distribución pluviométrica desigual, con un claro periodo seco en verano, factores que condicionan de forma significativa el desarrollo y la planificación de los cultivos.

c. Caracterización térmica de la zona de estudio

Aunque el análisis climático se basa en la serie 2008–2024, se ha seleccionado el año 2024 para ilustrar de forma detallada la distribución térmica anual reciente, dado que constituye el año más reciente con registros completos y continuos, lo que garantiza la fiabilidad del análisis y su relevancia para la planificación del cultivo. En la Tabla 13. se recoge las temperaturas medias mensuales, así como los valores máximos y mínimos registrados en cada mes.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temp Media (ºC)	7.53	8.07	9.78	12.91	16.91	21.36	26.92	27.2	19.13	15.12	10.96	5.49
Temp Max (ºC)	20.78	19.71	24.76	27.04	34.97	36.31	**40.46**	39.78	32.19	28.36	20.71	18.22
Temp Mínima (ºC)	-4.79	-2.84	-2.91	-1.48	-0.55	9.11	11.87	13.07	5.26	2.9	-1.28	**-5.4**

Tabla 13. Temperaturas medias, máximas y mínimas registradas en la estación agroclimática de Mora durante el año 2024.

Los valores registrados durante el año 2024 confirman el patrón identificado en el diagrama ombrotérmico: inviernos fríos, con enero y diciembre como los meses más fríos del año, y veranos cálidos, destacando especialmente los meses de junio, julio y agosto por sus temperaturas máximas elevadas. Asimismo, se observan ciertos picos térmicos en ambas estaciones, como heladas invernales por debajo de -5 °C y máximas estivales por encima de 40 °C.

A continuación, en la Figura 30, se presenta la evolución de las temperaturas durante los años 2008 a 2024, con el objetivo de detectar posibles cambios en las dinámicas térmicas o identificar patrones recurrentes.

Se ha seleccionado el mes de enero como representante del periodo frío, ya que concentra la mayoría de los registros con temperaturas mínimas extremas y presenta, con mayor frecuencia, las temperaturas medias más bajas del año.

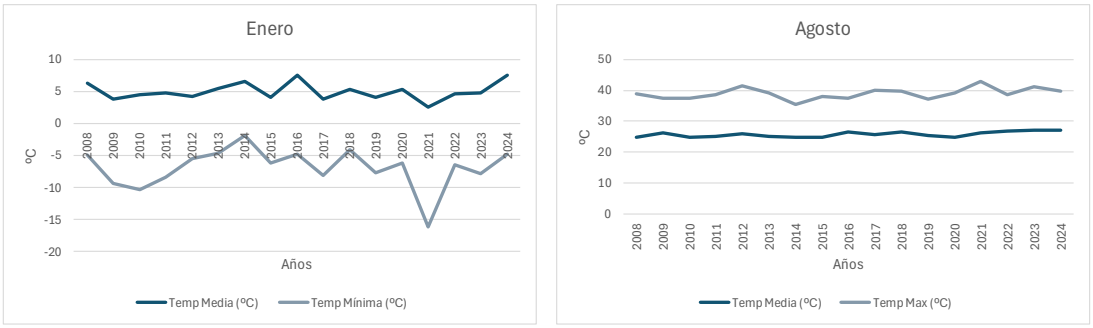


Figura 30. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas en los meses de enero y agosto en la estación agroclimática de Mora (2008–2024).

Para el periodo estival, se ha elegido el mes de agosto, dado que coincide en la mayoría de los años con las temperaturas medias más elevadas y los máximos térmicos absolutos, lo que lo convierte en un buen indicador del comportamiento térmico del verano.

La evolución de las temperaturas durante los meses de enero y agosto entre 2008 y 2024 no muestra tendencias claramente definidas ni un comportamiento térmico sistemáticamente ascendente o descendente. En ambos casos, tanto las temperaturas medias como las extremas se mantienen dentro de un rango relativamente constante, lo que sugiere una estabilidad térmica a escala local durante el periodo analizado. En enero, se observa una variabilidad más acusada en las temperaturas mínimas absolutas, con inviernos suaves alternando con episodios de heladas intensas, como el registrado en 2021. Aunque estos cambios no permiten extraer conclusiones sobre dinámicas climáticas de largo plazo, sí evidencian que el riesgo de heladas puntuales persiste y debe ser considerado en la planificación de la siembra.

En agosto, la evolución térmica ha sido más uniforme. Las temperaturas medias se han mantenido próximas a los 27 °C, y las máximas absolutas rara vez han superado los 40 °C. En conjunto, los datos no muestran un aumento sostenido ni un cambio estructural, por lo que puede hablarse, con cautela, de un comportamiento relativamente estable en ambas estaciones extremas del año.

En conjunto, estas condiciones no representan un factor crítico ni limitante para *C. sativa*, ya que la especie tolera heladas ligeras en estadios iniciales sin una reducción drástica del porcentaje de germinación final. No obstante, los resultados del ensayo térmico realizado indican que la germinación comienza a mostrar un ritmo positivo y estable a partir de 15 °C, alcanzando valores óptimos entre 20 y 25 °C en función de la variable evaluada. Por ello, se recomienda programar la implantación del cultivo en periodos en los que la temperatura media se sitúe dentro de este rango.

d. Caracterización pluviométrica de la zona de estudio

Para entender mejor cómo se distribuye la lluvia a lo largo del año y qué implicaciones puede tener en el manejo del cultivo, se ha revisado el comportamiento pluviométrico de la zona. Esta información resulta útil para planificar el riego, escoger el momento más adecuado de siembra y anticiparse a posibles situaciones de escasez de agua.

En la Figura 31 se muestra la evolución de la precipitación media anual registrada entre 2008 y 2024.

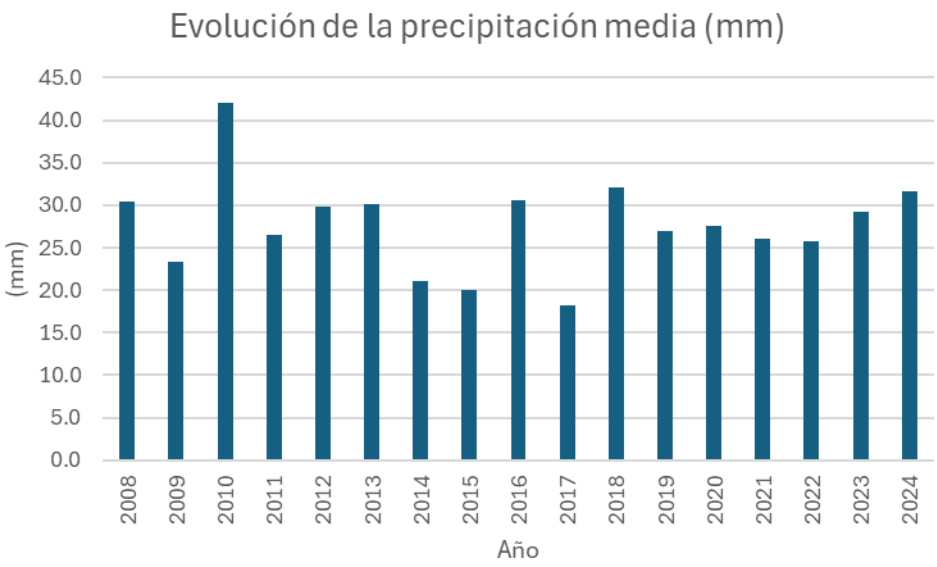


Figura 31. Evolución de la precipitación media anual en el periodo 2008–2024 en el municipio de Mora (Toledo).

Se observa cierta variabilidad interanual, con valores máximos en 2010 y mínimos en 2017. A pesar de estas oscilaciones puntuales, la mayoría de los años se sitúan dentro de un rango de precipitaciones relativamente estable, en torno a los 25–30 mm de media mensual.

Para poder comprender los datos presentados se ha aplicado la clasificación climática de Köppen, ampliamente difundida entre geógrafos y reconocida internacionalmente. El proceso ha consistido en identificar, de forma progresiva, el grupo, subgrupo y subdivisión correspondientes:

- **Grupo:**
  Se cumple P(cm)<2 * tm +14 ➔ **B (seco):** Escasa pluviosidad y altas temperaturas. Climas secos. La precipitación puede estar uniformemente distribuida en el año.

- **Subgrupo:**
  Se cumple P(cm) uniforme y tm+7< P(cm)<2*tm+14 ➔ **S (semiárido)**

- **Subdivisión:**
  Se cumple tm< 18ºC ➔ **k (seco y frío) explicar tm y P**

Por lo tanto, el clima de la zona de estudio se identifica como **BSk**, correspondiente a un **clima seco, semiárido y frío**.

A continuación, se ha elaborado la Figura 32 que muestra la distribución mensual de la precipitación, comparando los valores medios del periodo 2008–2024 con los del último año con datos completos disponibles (2024).

- Se observa un patrón claramente estacional, típico de los climas semiáridos y mediterráneos, con máximos de precipitación concentrados en primavera y otoño, y un mínimos pronunciados en verano, especialmente en los meses de julio y agosto. El año 2024 reproduce esta distribución general, aunque con una mayor intensidad en los extremos, lo que puede interpretarse como una acentuación del carácter estacional de las precipitaciones en años recientes.

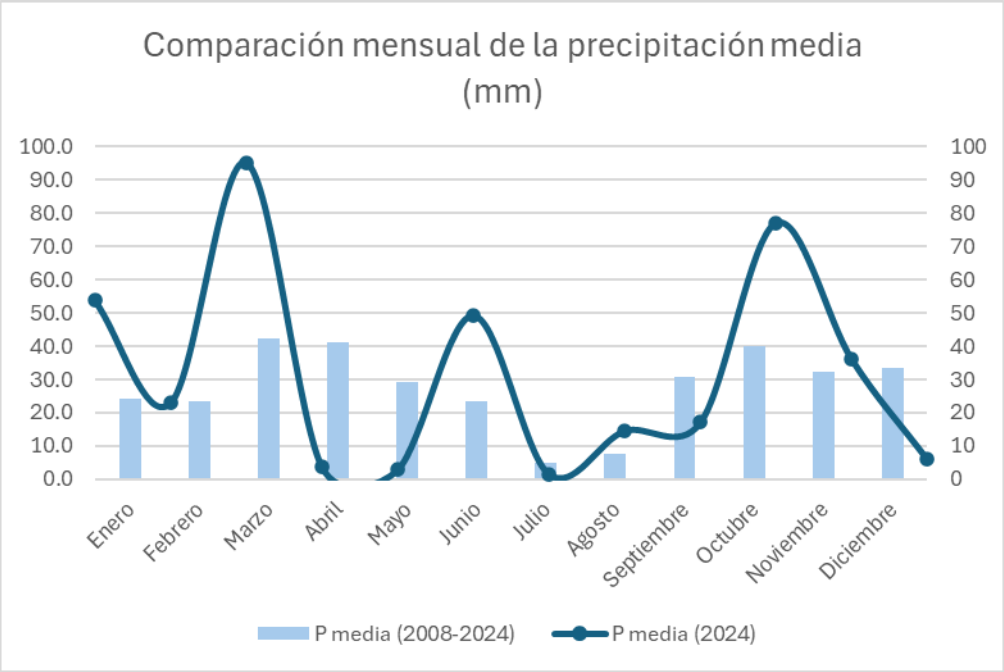


Figura 32. Comparación mensual de la precipitación media entre el periodo 2008–2024 y el año 2024 en el municipio de Mora (Toledo).

Finalmente, se ha realizado un estudio con los valores de la evapotranspiración potencial mensual proporcionados por la estación. En la Figura 33. se puede observar el balance hídrico promedio de cada mes, a partir de los valores de 2008 hasta 2024.

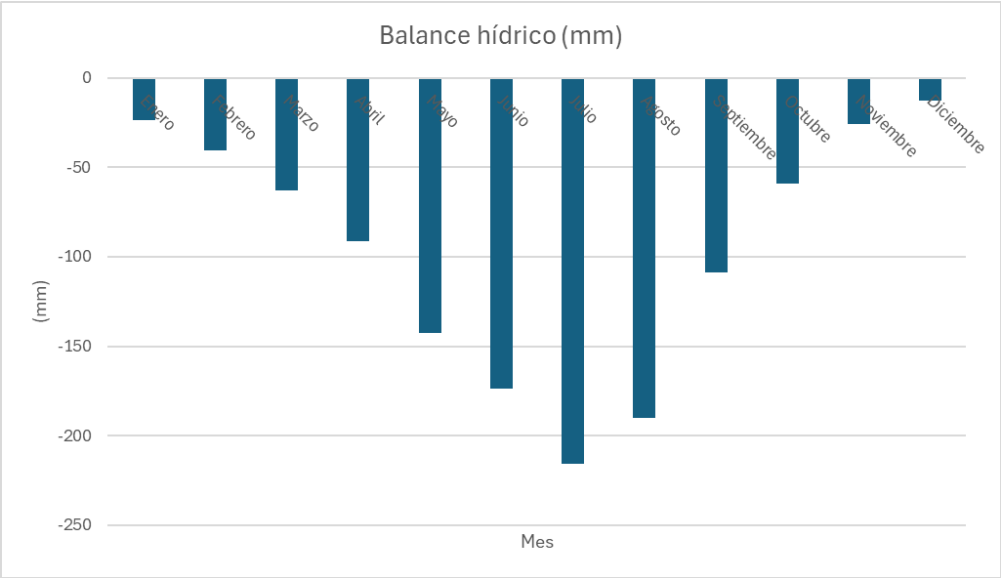


Figura 33. Balance hídrico mensual medio en el municipio de Mora (Toledo) para el periodo 2008–2024.

El balance hídrico medio mensual, calculado a partir de la diferencia entre la precipitación efectiva (PeP) y la evapotranspiración potencial (ETP), muestra valores negativos en todos los meses del año, lo que indica un déficit hídrico persistente a lo largo de todo el ciclo anual. No obstante, es importante destacar que este cálculo se ha realizado utilizando ETP en ausencia de datos de evapotranspiración real o del cultivo (ETc), lo que tiende a sobreestimar la demanda hídrica, al asumir disponibilidad ilimitada de agua en el suelo y un desarrollo vegetal óptimo. Por tanto, si bien el resultado corrobora el carácter seco y semiárido del clima local, la magnitud del déficit debe interpretarse con cautela.

1. Estudio edafológico:

a. Situación geológica:

Para el estudio geológico de la parcela se ha utilizado el servicio de cartografía geológica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2025), correspondiente a la serie MAGNA 50 (2ª Serie). Se ha empleado la hoja 686 (Turleque), en la que se integra la parcela experimental. A partir de esta cartografía se elaboró la Figura 34, en la que se representa la delimitación de la parcela y la ubicación exacta del punto de calicata (perfil S042), así como las unidades litológicas presentes en el entorno.

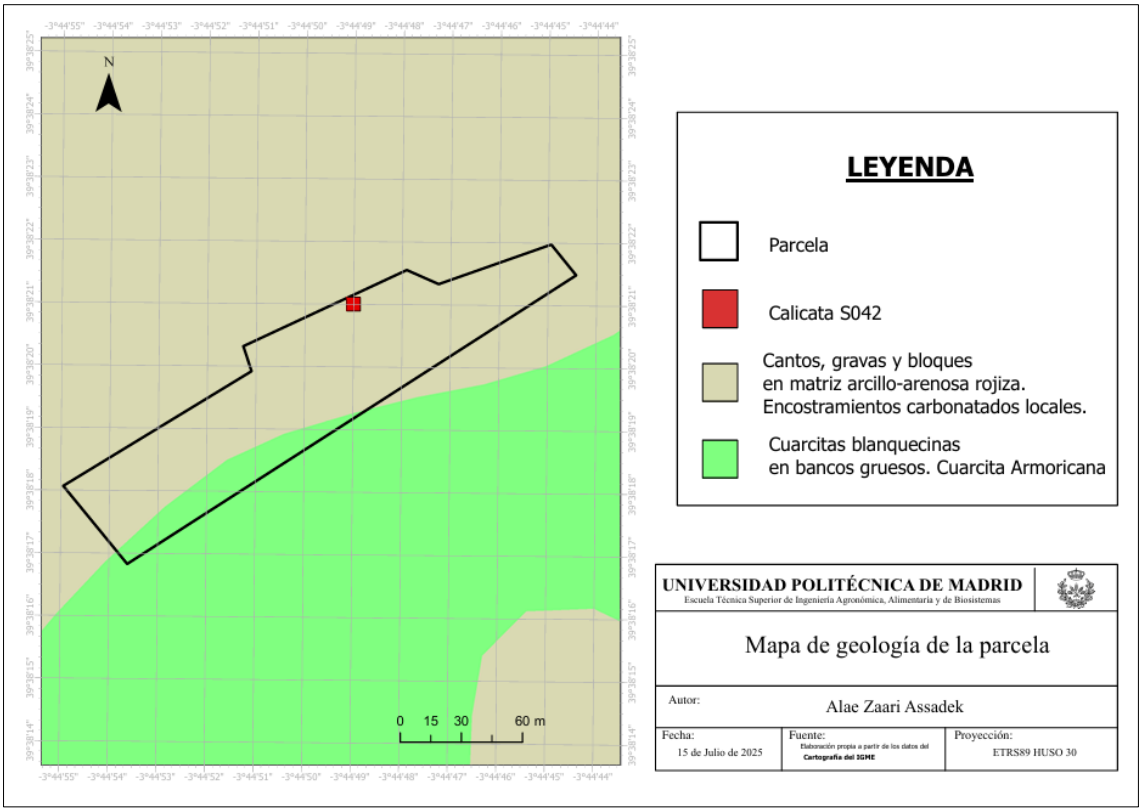


Figura 34. Mapa geológico de la parcela experimental, indicando el punto de calicata (perfil S042). Elaboración propia a partir del IGME, Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja 686 Turleque.

En el mapa presentado anteriormente, se puede observar que gran parte de la parcela se sitúa sobre la unidad cartográfica 19 (cantos, gravas y bloques en matriz arcillo–arenosa rojiza, con presencia de encostramientos carbonatados). Litológicamente, se trata de derrubios principalmente de naturaleza cuarcítica y, en menor medida, pizarrosa. Los clastos se encuentran inmersos en una matriz arcillosa rojiza en proporciones que oscilan entre el 20 y el 40 %, sin organización interna definida. Esta matriz, de origen edáfico y transportada, corresponde a la transformación de suelos originales en suelos rojos fersialíticos. En algunos sectores se observan encostramientos carbonatados.

En la zona suroeste de la parcela, se puede observar la presencia de la unidad cartográfica 9 (cuarcitas blanquecinas en bancos gruesos. Cuarcita armoricana). Está formada por ortocuarcitas y areniscas cuarcíticas muy recristalizadas y diaclasadas, con predominio del cuarzo y baja proporción de minerales accesorios. Su elevada dureza y baja meteorización favorecen el desarrollo de suelos muy poco evolucionados y con escasa capacidad de retención hídrica, lo que contrasta con las condiciones edáficas de la unidad 19.

b. Estudio del perfil del suelo:

- Localización del muestreo

El perfil edafológico empleado en este estudio corresponde a la calicata **S042**, realizada dentro de la propia parcela experimental por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Las coordenadas del punto de muestreo son: 9°38′21″ N – 3°44′49″ W y 780 m de altitud. Por razones de disponibilidad de tiempo, no fue posible realizar un nuevo muestreo y análisis de laboratorio. Sin embargo, se seleccionó el perfil S042 por su ubicación exacta dentro de la parcela y su coincidencia con la unidad litológica dominante, garantizando la representatividad de las condiciones edáficas. En un escenario con mayor disponibilidad temporal, sería recomendable complementar esta caracterización con muestreos en otras zonas de la parcela para verificar la homogeneidad y reforzar la robustez de los resultados.

- Horizontes del perfil y elementos gruesos

El perfil S042 presenta cuatro horizontes principales, como se muestra en la Figura 35.

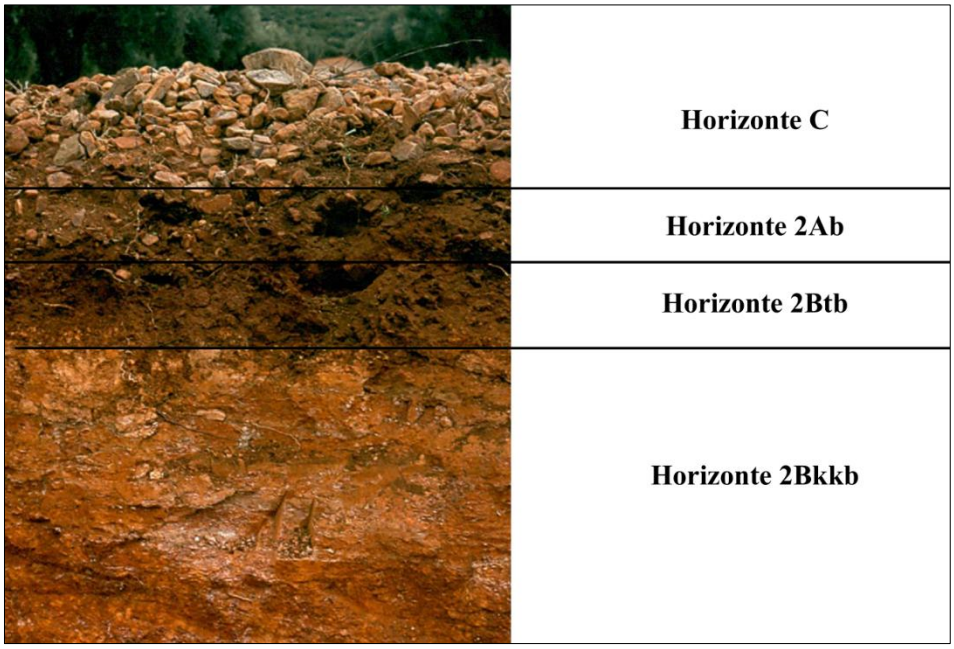


Figura 35. Horizontes edáficos reconocidos en la calicata S042

El primer horizonte observado porta la letra **C**, lo que indica que se trata de un horizonte de material mineral no consolidado (excluyendo la roca madre), sin o con escasos procesos pedogenéticos. El segundo horizonte, identificado como **2Ab**, corresponde a un horizonte mineral desarrollado a partir de un material parental distinto al del horizonte superficial (número 2), con elevado contenido de materia orgánica y características propias de un suelo enterrado (*b*). El tercer horizonte (**2Btb**) indica un horizonte mineral situado por debajo del horizonte A, con acumulación de arcilla iluvial (*t*) y evidencias de suelo enterrado (*b*). Finalmente, el horizonte **2Bkkb** corresponde igualmente a un horizonte mineral enterrado, pero con acumulación de carbonatos

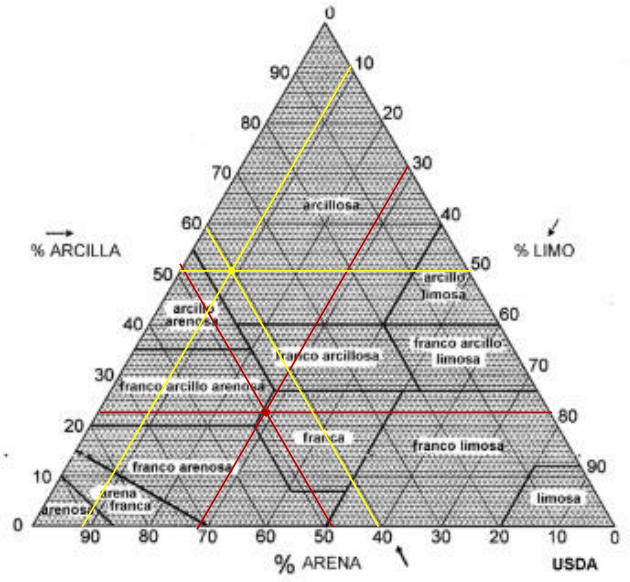
secundarios (*k*). El número **2** en los tres casos indica que el material parental de dichos horizontes es distinto al del horizonte superficial. (Adaptado de Dorronsoro Fernández, s.f.).

- Propiedades físicas

Para el siguiente proyecto, conviene hacer un estudio de los horizontes 2Ab (30–50 cm) y 2Btb (50–80 cm), por ser los probablemente accesibles al sistema radicular de *C. sativa* y donde se concentra la mayor parte del almacenamiento de agua útil y la disponibilidad de nutrientes. El horizonte C (0–30 cm) no se incluye en los cálculos debido a su extrema pedregosidad (~97 % >2 mm), que impide que la textura analítica represente su comportamiento real.

- Textura

Para determinar la textura del horizonte 2Ab y 2Btb se ha empleado el triángulo de texturas del suelo, representado en la Figura 36.



Horizonte 2Ab

Arena	Limo	Arcilla
48,1 (%)	28,1 (%)	23,8 (%)

Horizonte 2Btb

Arena	Limo	Arcilla
40,1 (%)	8,1 (%)	51,8 (%)

Figura 36. Clasificación textural de los horizontes 2Ab y 2Btb según el triángulo de texturas del USDA, elaborada a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla.

El horizonte 2Ab (30–50 cm) presentó una textura franca, mientras que el horizonte 2Btb (50–80 cm) mostró una textura arcillosa.

- Densidad aparente

En ausencia de datos referentes a las densidades, se adoptó un valor estándar de 2.65 g/cm³ para la densidad real del suelo. La densidad aparente, por su parte, se estimó a partir del diagrama y la ecuación representados en la Figura 37. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron contrastados con los rangos de referencia establecidos por la USDA (1999), que se recogen en la Tabla 14, con el fin de evaluar su idoneidad para el desarrollo radicular.

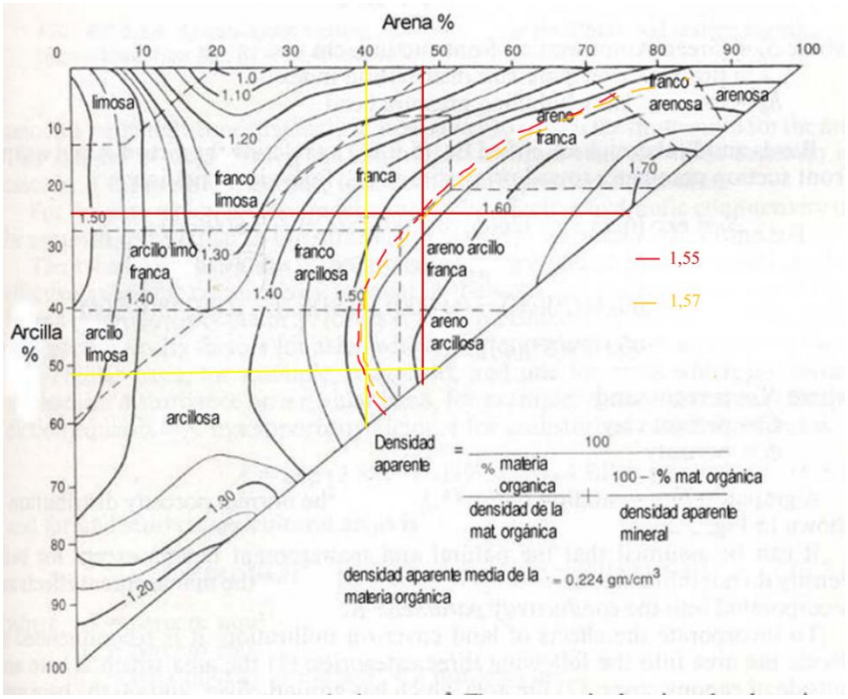


Figura 37. Determinación de la densidad aparente del suelo a partir del contenido de materia orgánica y la textura.

- Horizonte 2Ab:

$$da = \frac{100}{\frac{3.5}{0.224}+\frac{100-3.5}{1.55}} = 1.28 \text{ g/cm}^3 \qquad \%\text{porosidad} = \left(1 - \frac{1.28}{2.65}\right) * 100 = 51.7$$

- Horizonte 2Btb:

$$da = \frac{100}{\frac{0.7}{0.224}+\frac{100-0.7}{1.57}} = 1.55 \text{ g/cm}^3 \qquad \%\text{porosidad} = \left(1 - \frac{1.55}{2.65}\right) * 100 = 41.5$$

Tabla 14. Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo. Fuente: USDA, 1999

Textura del suelo	Densidades aparentes ideales (g/cm^3)	Densidades aparentes que pueden afectar el desarrollo radicular (g/cm^3)	Densidades aparentes que restringen el crecimiento radicular (g/cm^3)
Arena , areno-franco	<1.60	1.69	> 1.80
Franco arenosa, franco	<1.40	1.63	> 1.80
Franco-arcilla-arenosa, franco, franco arcillosa	<1.40	1.60	> 1.75

Limosa, franco-limosa	<1.30	1.60	> 1.75
Franco-limosa, franco-arcillo-limosa	<1.40	1.55	> 1.65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa, algunas franco-arcillosas (35-45% de arcilla)	<1.10	1.39	> 1.58
Arcillosa (>45% de arcilla)	<1.10	1.39	> 1.47

El primer horizonte analizado (2Ab), cuya textura es franca, presenta una densidad aparente calculada de 1,28 g/cm³ y una porosidad del 51,7 %. Este valor comparado respecto al umbral recogido en la Tabla 14 nos indica que este horizonte presenta una estructura favorable para el desarrollo de las raíces.

Por el contrario, el horizonte 2Btb, con textura arcillosa, alcanzó una densidad aparente de 1,55 g/cm³ y una porosidad del 41,5 %. Dicho valor supera el umbral restrictivo establecido para suelos arcillosos (>1,47 g/cm³), lo que indica una severa limitación para el crecimiento de las raíces, asociada a una mayor compactación y menor espacio poroso funcional.

- Propiedades hídricas del suelo

Para conocer la situación hídrica en el suelo es importante entender ciertos conceptos previos. Según la FAO (2005), la capacidad de campo (CC) se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. Por otro lado, el punto de marchitez permanente (PMP) corresponde al nivel en el cual las plantas deben ejercer una succión de 15 bares (1,5 MPa), siendo incapaces de absorber agua y resultando en su marchitez (FAO, s.f.). La diferencia entre ambos parámetros define la Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD), que corresponde a la fracción de agua aprovechable por la planta (comprendido entre -0,033 MPa (CC) y -1,5 MPa (PMP)).

Considerando que la profundidad efectiva de exploración radicular de *C. sativa* puede alcanzar valores de 1,0 a 1,4 m (Hunsaker et al., 2011; Pavlista et al., 2016; Kovar et al., 2023), pero que la mayor densidad de raíces se sitúa en los primeros 15 cm (Pavlista et al., 2016; Kovar et al., 2023), se ha optado por incluir en el cálculo del CRAD la suma de los horizontes 2Ab y 2Btb (30 a 80 cm). En el caso del horizonte 2Ab, este valor es de 25.5 mm y en el caso del horizonte 2Btb el valor desciende a 24 mm. Por lo tanto, el agua total disponible para el cultivo sería

aproximadamente de 50 mm. Este valor corresponde a una profundidad de 50 cm, lo que equivale a aproximadamente 99 mm si se normaliza a 1 m de suelo. De acuerdo con los rangos establecidos por Kristensen et al. (2019), dicho valor se ubica en la categoría media de capacidad de agua disponible (100–200 mm), lo que refleja una disponibilidad hídrica moderada para el cultivo.

En conclusión, el horizonte superficial (2Ab) muestra una densidad aparente y porosidad adecuadas para el desarrollo radicular mientras que el subsuperficial (2Btb) revela una mayor compactación y una textura arcillosa que podrían limitar la penetración de raíces y el movimiento de agua. La capacidad de retención de agua disponible (CRAD) total de los horizontes evaluados (≈ 50 mm) se traduce en una autonomía hídrica moderada, lo que implica que el cultivo de *C. sativa* podría necesitar de aportes hídricos adicionales o la sincronización de los periodos de mayor precipitación.

- Propiedades químicas

Reacción del suelo (pH)

El análisis edáfico del suelo presentó valores de pH de 8,2 en el horizonte 2Ab y 7,9 en el horizonte 2Btb (Tabla 15).

Tabla 15. Valores pH de los horizontes 2Ab y 2Btb

Horizonte	pH en H_2O
2Ab	8.2
2Btb	7.9

Ambos valores se sitúan por encima de 7, considerándose suelos alcalinos. Este parámetro condiciona principalmente la disponibilidad de nutrientes, ya que valores elevados de pH reducen la solubilidad de fósforo, hierro y otros micronutrientes esenciales, tal como se corrobora en la Figura 38.

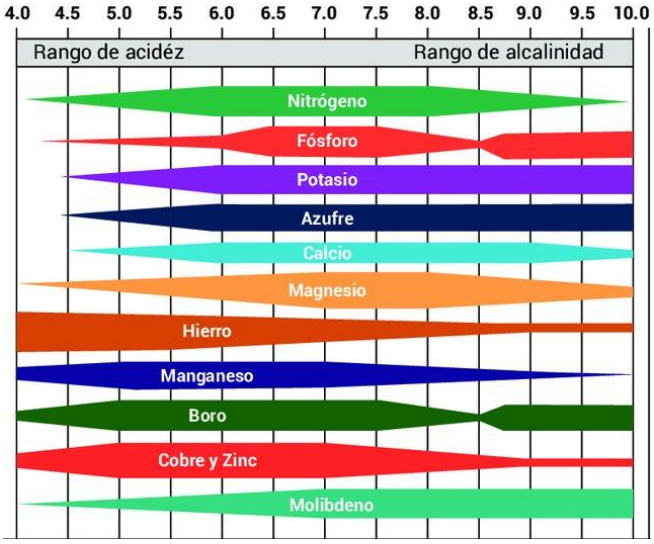


Figura 38. Disponibilidad de nutrientes según el pH del suelo (Castellanos, 2000, citado en Velasco Molina, 2018).

Si bien este rango no es el óptimo para la mayoría de los cultivos, no representa una situación extrema para *C. sativa*. Moore et al. (2019), establecen que la especie puede desarrollarse en un intervalo de pH de 5,5 a 8,0, con tolerancia hasta valores cercanos a 8,5, punto a partir del cual los rendimientos tienden a disminuir. Por tanto, los valores encontrados (7,9–8,2) se encuentran dentro de su rango de tolerancia, aunque prácticas correctoras como la aplicación de fertilizantes acidificantes (ej. sulfato amónico) podrían mejorar la disponibilidad de nutrientes.

- Conductividad eléctrica (CE)

Los horizontes analizados presentaron un valor de 0.2 dS/m, lo que sitúa al suelo dentro de la categoría de no salino (0–0.98 dS/m). Este valor se encuentra muy por debajo del umbral establecido en la Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo de la USDA (Tabla 16), por lo que no se esperan restricciones en el rendimiento de los cultivos. Asimismo, la actividad microbiana apenas se ve afectada en este rango de CE, manteniéndose procesos clave de mineralización y ciclado de nutrientes.

Tabla 16. Clasificación de la salinidad del suelo según la conductividad eléctrica (CE) a 25 °C. Fuente: USDA, 1999

Conductividad Eléctrica (dS/m)	Clase de salinidad	Respuesta de Cultivo	Respuesta Microbiana
0-0.98	No salino	Efectos casi despreciables	Pocos organismos afectados
0.98-1.71	Muy ligeramente salino	Se restringen los rindes de cultivos muy sensibles	Se alteran procesos microbianos seleccionados

1.71-3.16	Ligeramente salino	Se restringen los rindes de la mayoría de los cultivos	Son influenciados los principales procesos microbianos
3.16-6.07	Moderadamente salino	Solo cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente	Predominan microorganismos tolerantes
>6.07	Fuertemente salino	Solo los cultivos muy tolerantes rinden satisfactoriamente	Unos poco organismos halofilicos seleccionados se mantienen activos.

- Carbonatos (% $CaCO_3$)

El contenido de carbonatos (% $CaCO_3$) presentó valores muy distintos en los tres horizontes. En los horizontes 2Ab (7,8 %) y 2Btb (1,5 %). Según Garrido (1993) valores inferiores al umbral de 15 % no suelen presentar problemas significativos para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, en el horizonte 2Bkkb obtuvo un valor del 76,7 %, muy superior al límite del 35 % a partir del cual pueden manifestarse limitaciones agronómicas. Esta elevada acumulación de carbonatos puede explicar el pH alcalino registrado en los perfiles, reduciendo la disponibilidad de ciertos nutrientes. No obstante, es poco probable que el cultivo desarrolle raíces en esta profundidad.

- Propiedades biológicas

- Contenido en materia orgánica

El horizonte 2Ab presentó un valor de 3,5 %, lo que indica una adecuada presencia de materia orgánica, favoreciendo la estructura del suelo, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. En contraste, los horizontes 2Btb (0,7 %) y 2Bkkb (0,8 %) mostraron valores más bajos.

- Relación C/N

Valores altos en la relación C/N indican una descomposición lenta de la materia orgánica, mientras que valores bajos se asocian a una mineralización más rápida. En los horizontes 2Ab (C/N = 9) y 2Btb (C/N = 8) se observan valores semejantes, ambos bajos, lo que indica que la materia orgánica de estos horizontes se descompone con rapidez, liberando nitrógeno al suelo.

- Conclusión

C. sativa es una especie que destaca por su notable tolerancia a condiciones edáficas desfavorables y por requerir un bajo nivel de insumos para su cultivo (Zanetti et al., 2013). En este anejo se han analizado los dos horizontes más relevantes para el crecimiento del cultivo. El horizonte 2Btb se caracteriza por su textura arcillosa, elevada compactación y bajo contenido en materia orgánica, lo que limita su calidad agronómica. En contraste, el horizonte 2Ab presenta condiciones más

favorables: textura franca, mayor contenido de materia orgánica, densidad aparente óptima y un pH básico dentro del rango de tolerancia de la especie, sin problemas de salinidad.

Cabe señalar que este estudio presenta la limitación de no disponer de datos analíticos sobre el contenido específico de nutrientes y micronutrientes del suelo (N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, entre otros). En consecuencia, aunque los resultados edáficos no incluyeron valores referentes a nutrientes y micronutrientes, el pH básico identificado sugiere que algunos elementos esenciales podrían encontrarse en baja disponibilidad. Por este motivo, se recomienda aplicar una fertilización de fondo, preferiblemente con productos de liberación lenta, complementada con una fertilización de cobertera, con el fin de suplir posibles carencias, garantizar el aporte de nitrógeno y mantener un equilibrio adecuado en el suelo. Además, determinados fertilizantes pueden contribuir a reducir ligeramente el pH, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes y equilibrando la reacción del suelo.

Respecto a la capacidad de retención de agua, se observa un nivel moderado que permitiría prescindir del riego. Esta condición es coherente con los balances hídricos calculados en el anejo de climatología, que siendo sobredimensionamiento resultaron negativos en todos los meses del año, no representan un factor limitante dada la baja demanda hídrica de la especie. Además, el uso de variedades de ciclo corto permite programar la siembra para que coincida con los meses de mayor precipitación, reduciendo riesgos por déficit hídrico.

Finalmente, el manejo del cultivo debería orientarse hacia un mínimo laboreo, con el fin de evitar una mayor compactación del horizonte 2Btb. La siembra superficial resulta igualmente recomendable. De esta manera, el sistema productivo puede apoyarse en prácticas sostenibles que garanticen la viabilidad agronómica sin comprometer la productividad ni el rendimiento del cultivo.

Trabajo de Fin de Grado

Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

Anejo IV:

Programa y Estudio de maquinaria agraria

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ingeniería Agroambiental

El presente proyecto tiene como objetivo el establecimiento de un monocultivo de *Camelina sativa* en una parcela de 1,16 hectáreas. En este anejo se recoge la selección de la maquinaria agrícola necesaria para llevar a cabo las distintas labores asociadas al ciclo de cultivo.

En primer lugar, se detallan las operaciones a realizar, desde la preparación inicial del terreno hasta la cosecha, con el fin de justificar la elección de los equipos empleados en cada fase.

- Preparación del terreno

La primera acción en llevarse a cabo para preparar el terreno consistirá en la retirada puntual y manual de piedras. Se aplicará un criterio visual a la hora de la retirada, seleccionando aquellas zonas con mayor densidad o con piedras de gran volumen que puedan dificultar el paso de la maquinaria o el contacto de la semilla con el suelo en el momento de siembra. Las piedras extraídas se acumularán en los lindes o en zonas designadas de la parcela, evitando así interferencias con las labores posteriores.

A continuación, y con el fin de reducir la competitividad entre especies no deseadas y el cultivo de camelina, así como para incrementar la eficacia del trabajo de siembra, se procederá al desbroce de la vegetación existente. Para esta tarea se empleará una desbrozadora de martillos acoplada a un tractor ligero. La elección de un tractor de este calibre es debido a la reducida superficie de la parcela, que no necesita maquinaria de mayor tamaño y con el fin de minimizar la compactación del suelo. En caso de vegetación arbustiva densa con tallos leñosos de mayor diámetro, se considerará el uso de equipos de cadenas o trituradora forestal.

Se ha decidido no realizar ningún laboreo, debido a varios factores:

1º- Debido a los altos valores de pendiente que podrían resultar en una mayor erosión y perdida del terreno.

2º- Dada la alta pedregosidad de la parcela.

3º- Con el objetivo de evitar agravar la compactación existente en el horizonte 2Btb.

Del mismo modo, se han delimitado bordes laterales de 2,5 metros de anchura para el tránsito de la maquinaria, coincidiendo con las zonas de mayor pendiente, así como cabeceras de 6 metros, que permitirán efectuar giros de manera cómoda y segura sin afectar al resto del terreno cultivado.

- Siembra

Como se ha comentado previamente, el siguiente cultivo se hará mediante siembra directa. Esta elección se alinea con los principios de la agricultura de conservación, que promueven la mínima alteración del suelo, la reducción de la erosión y la mejora de la biodiversidad. Este enfoque,

además, ha demostrado reducir en torno a un 90 % las pérdidas de suelo por erosión y favorecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Landers, 2004).

La labor se realizará mediante una sembradora a chorrillo. En este caso, la separación entre líneas será de 16,6 cm, valor que se encuentra dentro del rango aconsejado para el correcto desarrollo del cultivo (12,5–22,5 cm), tal como recomiendan la Consejería de Agricultura (2021) y Camelina Company España (2024). Asimismo, y siguiendo dichas referencias, la profundidad de siembra será superficial (0,5–1,5 cm) y se establecerá una dosis de 8 – 10 kg/ha. La presencia o ausencia de luz en esta especie tiene un mínimo impacto en las tres variedades estudiadas, como se puede contrastar en Ensayo 2.

- Fertilización

Como se ha mostrado en el anejo 3, el análisis edáfico de la parcela presenta un pH básico, condición que puede limitar la disponibilidad de ciertos nutrientes. En particular, se prevé una disminución en la asimilación del fósforo (P) dentro de los macronutrientes, y de varios micronutrientes como hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn). No obstante, el análisis consultado no especifica unos valores concretos sobre dichos nutrientes, por lo que no se podrá calcular dosis de fertilización personalizadas por falta de datos. En su lugar se tomarán valores de referencia contrastados bibliográficamente. Según los protocolos agronómicos de camelina, la fertilización mínima recomendada es de 60–80 UF/ha de N, 30–40 UF/ha de P, 40–50 UF/ha de K y 12–24 UF/ha de S. El abonado de fondo debe aportar el fósforo y el potasio, junto con aproximadamente un 30 % del nitrógeno y el azufre, mientras que el resto se aplicará en cobertera, preferiblemente en estado de roseta (Camelina Company, 2020, 2024), siendo unidad de fertilizante (UF) referido como un kg puro de un elemento (Sembralia, 2021). En este caso se optará por usar, en caso de ser posible, los umbrales superiores para garantizar un suministro adecuado de nutrientes.

El cultivo de camelina puede verse negativamente afectado por el uso de herbicidas (Camelina, 2020). Asimismo, según Séguin-Swartz et al. (2009), esta especie presenta una elevada resistencia natural frente a enfermedades y plagas, por lo que inicialmente se prescindirá del uso de fitosanitarios.

- Cosecha y cuidados posteriores

La recolección de la camelina se llevará a cabo cuando los frutos presenten un cambio de color verde a amarillo o marrón cremoso, evitando retrasar la cosecha más de 7–10 días tras alcanzar la madurez fisiológica, con el fin de reducir pérdidas por dehiscencia.

1. Diseño del cultivo

- Elección varietal

Antes de empezar con el estudio del cronograma, conviene definir la variedad a emplear como base del diseño.

Aunque en el Ensayo 1 de germinación la variedad CCE26 (variedad 1, primaveral) mostró la mayor rapidez de germinación, su implantación en campo bajo condiciones de secano en Mora (Toledo) sería poco factible. Esta conclusión se fundamenta en que el ciclo primaveral coincide con el periodo de mayor déficit hídrico estival y exigiría riego, opción descartada en este proyecto. En contraste, las variedades de invierno (CCE44, variedad 2, e BLC000445, variedad 3) presentan una fenología más adecuada a las condiciones de la zona, al aprovechar las lluvias otoñales e invernales y evitar la necesidad de riego. Entre ambas, se selecciona la variedad invernal con requerimientos de vernalización no estrictos, ya que existe menor riesgo de fallo de floración y porque, en las condiciones térmicas analizadas donde se observaron diferencias entre variedades, alcanzó los mayores valores de crecimiento radicular y de vástago. Esta elección es coherente con los resultados del proyecto CAMEVAR, que validó el cultivo invernal de camelina en la Comunidad de Madrid con rendimientos netos en torno a 1 $t \cdot ha^{-1}$ en condiciones de secano (Mostaza-Colado et al. 2020).

- Fenología

Los periodos de siembra, floración y cosecha son esenciales para un correcto diseño temporal de las labores. A continuación, se presentan en la Tabla 17 la fenología de una variedad invernal de la especie de *C. sativa,* mientras que la Tabla 18 recoge la de una variedad de primavera.

Tabla 17. Fenología de una variedad invernal de C. sativa (Camelina Company, 2021) (Gutiérrez López & Albalat Borrás, 2013)

Meses	E	F	M	A	My	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D
Siembra									■	■	■	
Roseta	■	■	■									
Cosecha					■	■	■					

Tabla 18. Fenología de una variedad primaveral de C. sativa (Camelina Company, 2020)

Meses	E	F	M	A	My	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D
Siembra				■								
Roseta					■							
Cosecha									■	■		

Como se ha mencionado con anterioridad, los cultivos de camelina presentan distintas fechas de siembra, que permiten ajustarse a las condiciones agroclimáticas locales. En el caso de las variedades invernales (ciclo largo o ciclo medio), la siembra puede realizarse desde septiembre hasta febrero, dependiendo de la duración del ciclo.

2. Diseño de operaciones de manejo

- Labores de campo

Para el presente trabajo se ha decidido sembrar en septiembre, coincidiendo con el inicio de la temporada de lluvias, tal como se aprecia en el diagrama ombrotérmico del Anejo II (estudio edafoclimático). Esta decisión permite aprovechar al máximo los meses húmedos del otoño e invierno y reducir el riesgo de déficit hídrico. Esto nos permite garantizar un mejor desarrollo del cultivo hasta su maduración y cosecha a inicios del verano. No se establece una fecha concreta, para permitir decidir el día más adecuado una vez se aproxime la época de siembra.

La fertilización se realizará en dos tandas tal como recomienda Camelina company (2020):

- Abonado de fondo, previo a la labor de siembra. Para ello se ha optado por un abono complejo NPK 8-24-24. Esta formulación permite cubrir los rangos requeridos de fósforo y potasio (entendiéndose que las UF están expresadas en su forma elemental), aportando al mismo tiempo una fracción inicial de N. El nitrógeno encontrándose en esta formulación en forma amoniacal, se caracteriza por una liberación más gradual, reduciendo pérdidas por lixiviación y garantizando disponibilidad en las fases iniciales del cultivo.

  El cálculo de la dosis se ha realizado priorizando el requisito mínimo de fósforo, dado que este elemento presenta baja movilidad en el suelo y debe encontrarse disponible desde el establecimiento del cultivo. A continuación, se detallan en las ecuaciones los cálculos para obtener las dosis.

$$30\ Kg\ P/ha * \frac{1000g}{1Kg} * \frac{1\ mol\ P}{30.97\ \ g\ P} * \frac{1\ mol\ P_2O_5}{1\ mol\ P} * \frac{141.94\ g\ P_2O_5}{1\ mol\ P_2O_5} * \frac{1\ Kg}{1000g}$$

$$= 69\ Kg\ P_2O_5/ha$$

$$69\ Kg\ K_2O/ha * \frac{1000g}{1Kg} * \frac{1\ mol\ K_2O}{94\ g\ K_2O} * \frac{2\ moles\ K}{1\ mol\ K_2O} * \frac{39\ g\ K}{1\ mol\ K} * \frac{1\ Kg}{1000g} = 57\ Kg\ K/ha$$

$$\frac{24\ x}{100} = 69\ Kg\ K_2O = 69\ Kg\ \ P_2O_5 \rightarrow x = 287.5\ Kg\ Fertilizante/ha$$

$$287.5\ Kg\ Fertilizante * \frac{8}{100} = 23\ Kg\ N/ha$$

  Asimismo, se aplicará otro abono que suplirá las demandas de azufre.

$$\frac{52.9\ Kg\ S\ x}{100} = \frac{30 * 24\ Kg\ S}{100} \rightarrow x = 13.5\ Kg\ Fertilizante/ha$$

$$13.5\ Kg\ Fertilizante * \frac{15\ Kg\ N}{100} = 2\ Kg\ N/ha$$

Por lo tanto, se aplicarán 30 Kg de P, 57 Kg de K, 25 Kg de N y 7.2 Kg de S, todos en forma de abono granulado. Se usará una abonadora centrifuga.

- Abonado de cobertera, aplicado al cultivo en estado de roseta, donde se fertilizará con el resto de las unidades de nitrógeno (56 Kg N) y azufre (16.8 Kg S) necesarios. Se trata también de un producto granulado que se aplicará con una abonadora centrifuga. La dosis de fertilizante aplicada se detalla en la siguiente ecuación.

$$56\ Kg\ N = \frac{40x}{100} \rightarrow x = 140\ Kg$$

$$140\ Kg\ Fertilizante * \frac{12.5\ Kg\ S}{100} = 17.5\ Kg\ S$$

Finalmente, la cosecha se llevará a cabo cuando los frutos pasen de color verde a amarillo cremoso.

- <u>Cálculo de tiempos</u>

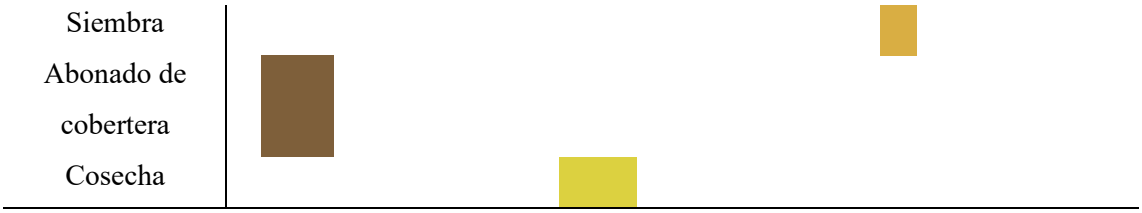
Para la realización de las labores de campo se han adoptado las siguientes condiciones de referencia:

- Se contemplan 20 días laborales al mes, una vez descontados los periodos festivos.
- La jornada laboral se establece en 8 horas/día, aplicando una deducción mínima de 30 minutos para el almuerzo.
- Las labores serán realizadas por una sola persona operaria.

En la Tabla 19 se recoge el cronograma de labores. Las fechas señaladas son orientativas y pueden ajustarse en función de las condiciones meteorológicas del momento, especialmente en lo relativo a la siembra y la fertilización.

Tabla 19. Cronograma de labores

Labor	E	F	M	A	My	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D
Retirada de piedras												
Desbroce												
Abonado de fondo												



- Cálculos anchuras útiles y capacidad de trabajo

Para poder establecer un cronograma claro de labores, es necesario calcular las anchuras útiles y las capacidades de trabajo de la maquinaria empleada. En la Tabla 20 se recogen los equipos seleccionados para cada operación del cultivo.

Tabla 20. Maquinaria a emplear en la parcela

Maquinaria	Labor
Desbrozadora de martillos	Preparación del terreno
Sembradora directa a chorrillo	Siembra
Abonadora centrífuga manual	Fertilización de fondo y cobertera
Cosechadora	Recolección

Para el cálculo de los dos parámetros nombrados se emplearán las siguientes formulas:

Anchura útil (a_u)

Maquinaria lineal

a_u= nº líneas * distancia entre líneas

Maquinaria con recubrimiento

a_u= Dt (anchura teórica) −R (solapamiento)

$$C\left(\frac{ha}{h}\right) = Capacidad\ de\ trabajo\left(\frac{ha}{h}\right) = \frac{a_u\ (m) * v\left(\frac{Km}{h}\right) * n}{10}$$

Al ser una parcela pequeña y con irregularidades en la pendiente, y a falta de estudios específicos en campo de la maquinaria, se establecerá un solapamiento del 10% para las máquinas con recubrimiento. Asimismo, para la maquinaria automatizada se empleará una velocidad de 4 Km/h y una eficacia del 65%, manteniendo así un borde en los cálculos. Para la abonadora, al ser una labor manual, se considerará una velocidad de 2 Km/h En la Tabla 21, se recogen las anchuras útiles calculadas junto a las capacidades de campo a partir de modelos concretos en el mercado.

Tabla 21. Resumen anchuras útiles de trabajo (a_u) y capacidades efectivas de trabajo (C)

Maquinaria	a_u (m)	C (ha/h)

Desbrozadora de martillos	1.58	0.455
Sembradora directa a chorrillo	3.98	1
Abonadora centrífuga manual	2.5	0.325
Cosechadora	4.1	1.1

No obstante, como se puede ver en la Tabla 21, se evidencia que la carga de trabajo para aperos es escasa y no justifica la adquisición de un parque propio de maquinaria. En consecuencia, resulta más razonable optar por el alquiler o subcontratación de determinados servicios y disponer de un tractor de potencia media para las labores auxiliares de la finca y una abonadora centrifuga manual.

Trabajo de Fin de Grado

Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

Anejo V:

Evaluación financiera

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ingeniería Agroambiental

EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 1: COSTES Y BENEFICIOS

FINANCIACION PROPIA

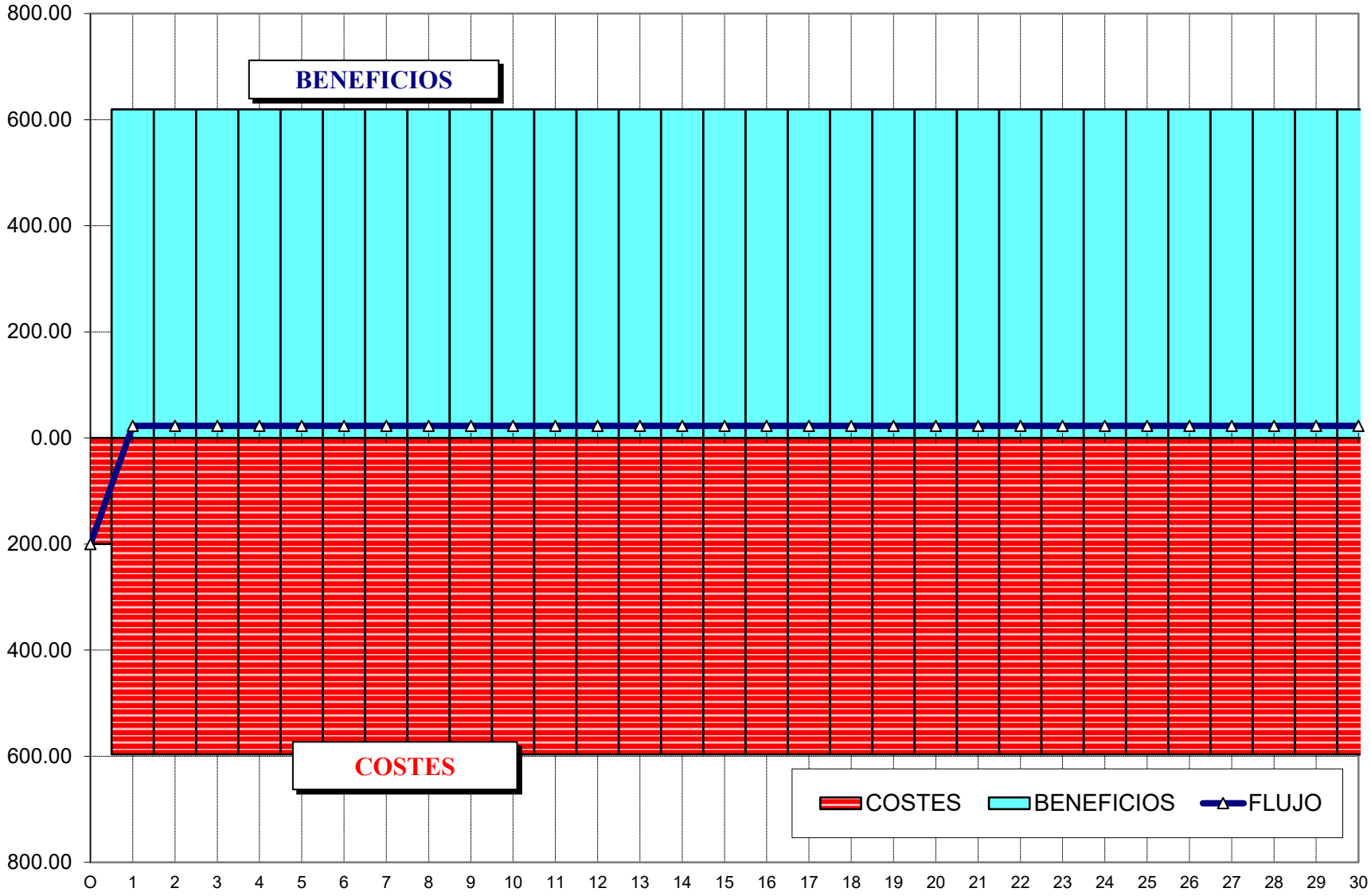
DATOS DE COSTES

AÑO	INVERSION	COSTE-1	COSTE-2	COSTE-3	COSTE-4	COST-FIN.	COSTE TOTAL
	200.00						200.00
1		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
2		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
3		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
4		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
5		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
6		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
7		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
8		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
9		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
10		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
11		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
12		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
13		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
14		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
15		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
16		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
17		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
18		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
19		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
20		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
21		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
22		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
23		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
24		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
25		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
26		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
27		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
28		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
29		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59
30		210.00	235.39	42.00	109.20		596.59

DATOS DE BENEFICIOS

AÑO	BENEF-1	BENEF-2	BENEF-3	BENEF-4	BENEF-5	BENF-FIN.	BENEFICIO TOT.
1	504.00	76.80	38.55				619.35
2	504.00	76.80	38.55				619.35
3	504.00	76.80	38.55				619.35
4	504.00	76.80	38.55				619.35
5	504.00	76.80	38.55				619.35
6	504.00	76.80	38.55				619.35
7	504.00	76.80	38.55				619.35
8	504.00	76.80	38.55				619.35
9	504.00	76.80	38.55				619.35
10	504.00	76.80	38.55				619.35
11	504.00	76.80	38.55				619.35
12	504.00	76.80	38.55				619.35
13	504.00	76.80	38.55				619.35
14	504.00	76.80	38.55				619.35
15	504.00	76.80	38.55				619.35
16	504.00	76.80	38.55				619.35
17	504.00	76.80	38.55				619.35
18	504.00	76.80	38.55				619.35
19	504.00	76.80	38.55				619.35
20	504.00	76.80	38.55				619.35
21	504.00	76.80	38.55				619.35
22	504.00	76.80	38.55				619.35
23	504.00	76.80	38.55				619.35
24	504.00	76.80	38.55				619.35
25	504.00	76.80	38.55				619.35
26	504.00	76.80	38.55				619.35
27	504.00	76.80	38.55				619.35
28	504.00	76.80	38.55				619.35
29	504.00	76.80	38.55				619.35
30	504.00	76.80	38.55				619.35

Gráfico5


800.00
600.00
400.00
200.00
0.00
200.00
400.00
600.00
800.00
BENEFICIOS
COSTES
COSTES
BENEFICIOS
FLUJO
O 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 3: INDICADORES DE EVALUACION

ESTRUCTURA: FINANCIACION PROPIA

AÑO	COSTES	BENEFICIOS	FLUJO
O	200.00	0.00	-200.00
1	596.59	619.35	22.76
2	596.59	619.35	22.76
3	596.59	619.35	22.76
4	596.59	619.35	22.76
5	596.59	619.35	22.76
6	596.59	619.35	22.76
7	596.59	619.35	22.76
8	596.59	619.35	22.76
9	596.59	619.35	22.76
10	596.59	619.35	22.76
11	596.59	619.35	22.76
12	596.59	619.35	22.76
13	596.59	619.35	22.76
14	596.59	619.35	22.76
15	596.59	619.35	22.76
16	596.59	619.35	22.76
17	596.59	619.35	22.76
18	596.59	619.35	22.76
19	596.59	619.35	22.76
20	596.59	619.35	22.76
21	596.59	619.35	22.76
22	596.59	619.35	22.76
23	596.59	619.35	22.76
24	596.59	619.35	22.76
25	596.59	619.35	22.76
26	596.59	619.35	22.76
27	596.59	619.35	22.76
28	596.59	619.35	22.76
29	596.59	619.35	22.76
30	596.59	619.35	22.76

TIR= 10.86%

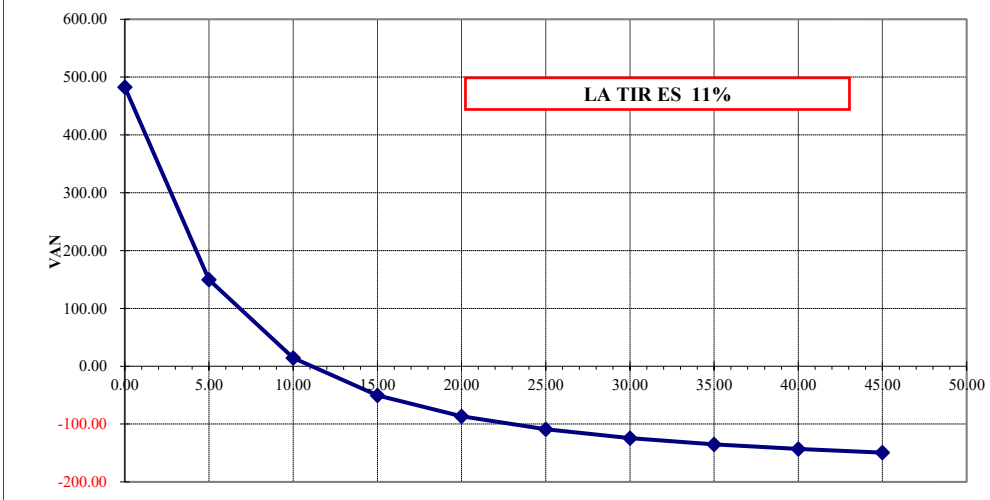
INDICADORES DE RENTABILIDAD
FINANCIACION PROPIA

%	VAN	B/C
0.00	482.80	1.03
5.00	149.88	1.02
10.00	14.56	1.00
15.00	-50.56	0.99
20.00	-86.68	0.97
25.00	-109.07	0.96
30.00	-124.16	0.94
35.00	-134.98	0.93
40.00	-143.10	0.92
45.00	-149.42	0.90

CONTROL GRAFICO
Increment. **3.00**

VAN al coc **0.10** **14.56**

REPRESENTACION DE LA CURVA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 4: ANALISIS DE SENSIBILIDAD

FINANCIACION PROPIA

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Variación de costes y beneficios expresada en %

HIPOTESIS DE COSTES

INVERSION	COSTE-1	COSTE-2	COSTE-3	COSTE-4	COST-FIN.
0	10	10	10	10	0

HIPOTESIS DE BENEFICIOS

BENEF-1	BENEF-2	BENEF-3	BENEF-4	BENEF-5	BENF-FIN.
-43	0	0	0	0	0

AÑO	COSTES	BENEFICIOS	FLUJO
O	200.00	0.00	-200.00
1	656.25	402.63	-253.62
2	656.25	402.63	-253.62
3	656.25	402.63	-253.62
4	656.25	402.63	-253.62
5	656.25	402.63	-253.62
6	656.25	402.63	-253.62
7	656.25	402.63	-253.62
8	656.25	402.63	-253.62
9	656.25	402.63	-253.62
10	656.25	402.63	-253.62
11	656.25	402.63	-253.62
12	656.25	402.63	-253.62
13	656.25	402.63	-253.62
14	656.25	402.63	-253.62
15	656.25	402.63	-253.62
16	656.25	402.63	-253.62
17	656.25	402.63	-253.62
18	656.25	402.63	-253.62
19	656.25	402.63	-253.62
20	656.25	402.63	-253.62
21	656.25	402.63	-253.62
22	656.25	402.63	-253.62
23	656.25	402.63	-253.62
24	656.25	402.63	-253.62
25	656.25	402.63	-253.62
26	656.25	402.63	-253.62
27	656.25	402.63	-253.62
28	656.25	402.63	-253.62
29	656.25	402.63	-253.62
30	656.25	402.63	-253.62

TIR= #¡NUM!

INDICADORES DE RENTABILIDAD FINANCIACION PROPIA

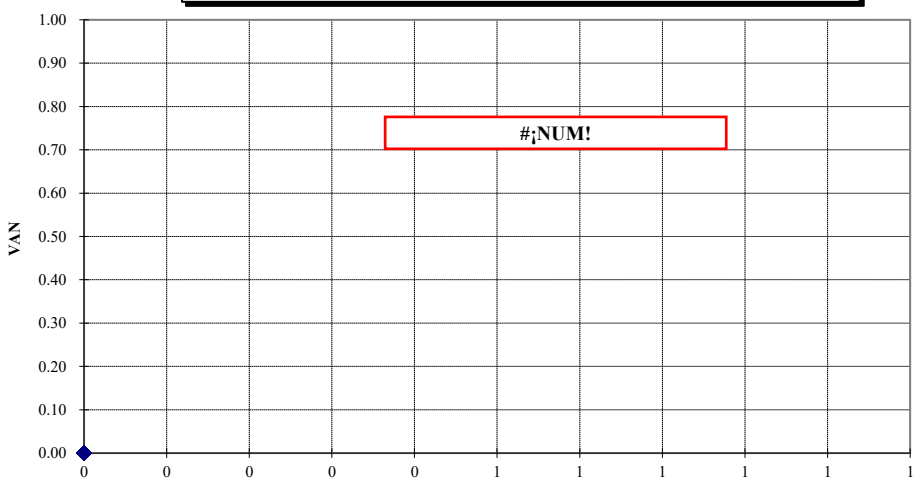
%	VAN	B/C
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!
#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!

VAN al coc **10.00%** **-2,590.84**

CONTROL DE LA TASA r

Incremento **5**

REPRESENTACION DE LA CURVA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 4: ANALISIS DE SENSIBILIDAD

FINANCIACION PROPIA

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Variación de costes y beneficios expresada en %

HIPOTESIS DE COSTES

INVERSION	COSTE-1	COSTE-2	COSTE-3	COSTE-4	COST-FIN.
0	0	0	0	0	0

HIPOTESIS DE BENEFICIOS

BENEF-1	BENEF-2	BENEF-3	BENEF-4	BENEF-5	BENF-FIN.
52	0	0	0	0	0

AÑO	COSTES	BENEFICIOS	FLUJO
O	200.00	0.00	**-200.00**
1	596.59	881.43	**284.84**
2	596.59	881.43	**284.84**
3	596.59	881.43	**284.84**
4	596.59	881.43	**284.84**
5	596.59	881.43	**284.84**
6	596.59	881.43	**284.84**
7	596.59	881.43	**284.84**
8	596.59	881.43	**284.84**
9	596.59	881.43	**284.84**
10	596.59	881.43	**284.84**
11	596.59	881.43	**284.84**
12	596.59	881.43	**284.84**
13	596.59	881.43	**284.84**
14	596.59	881.43	**284.84**
15	596.59	881.43	**284.84**
16	596.59	881.43	**284.84**
17	596.59	881.43	**284.84**
18	596.59	881.43	**284.84**
19	596.59	881.43	**284.84**
20	596.59	881.43	**284.84**
21	596.59	881.43	**284.84**
22	596.59	881.43	**284.84**
23	596.59	881.43	**284.84**
24	596.59	881.43	**284.84**
25	596.59	881.43	**284.84**
26	596.59	881.43	**284.84**
27	596.59	881.43	**284.84**
28	596.59	881.43	**284.84**
29	596.59	881.43	**284.84**
30	596.59	881.43	**284.84**

TIR= 142.42%

INDICADORES DE RENTABILIDAD FINANCIACION PROPIA

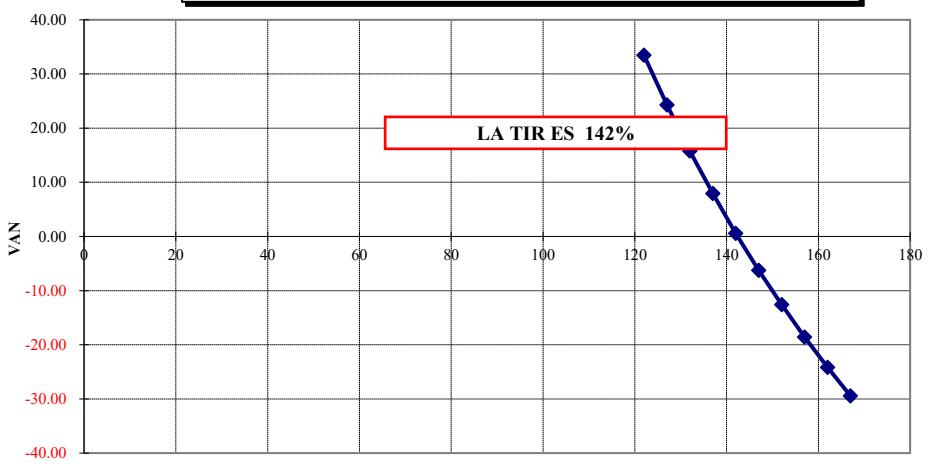
%	VAN	B/C
122	**33.48**	**1.05**
127	**24.28**	**1.04**
132	**15.79**	**1.02**
137	**7.91**	**1.01**
142	**0.59**	**1.00**
147	**-6.23**	**0.99**
152	**-12.61**	**0.98**
157	**-18.57**	**0.97**
162	**-24.17**	**0.96**
167	**-29.44**	**0.95**

VAN al coc **10.00%** **2,485.16**

CONTROL DE LA TASA r

Incremento **5**

REPRESENTACION DE LA CURVA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 4: ANALISIS DE SENSIBILIDAD

FINANCIACION PROPIA

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Variación de costes y beneficios expresada en %

HIPOTESIS DE COSTES

INVERSION	COSTE-1	COSTE-2	COSTE-3	COSTE-4	COST-FIN.
0	0	0	0	0	0

HIPOTESIS DE BENEFICIOS

BENEF-1	BENEF-2	BENEF-3	BENEF-4	BENEF-5	BENF-FIN.
0	0	15	0	0	0

AÑO	COSTES	BENEFICIOS	FLUJO
O	200.00	0.00	**-200.00**
1	596.59	625.13	**28.54**
2	596.59	625.13	**28.54**
3	596.59	625.13	**28.54**
4	596.59	625.13	**28.54**
5	596.59	625.13	**28.54**
6	596.59	625.13	**28.54**
7	596.59	625.13	**28.54**
8	596.59	625.13	**28.54**
9	596.59	625.13	**28.54**
10	596.59	625.13	**28.54**
11	596.59	625.13	**28.54**
12	596.59	625.13	**28.54**
13	596.59	625.13	**28.54**
14	596.59	625.13	**28.54**
15	596.59	625.13	**28.54**
16	596.59	625.13	**28.54**
17	596.59	625.13	**28.54**
18	596.59	625.13	**28.54**
19	596.59	625.13	**28.54**
20	596.59	625.13	**28.54**
21	596.59	625.13	**28.54**
22	596.59	625.13	**28.54**
23	596.59	625.13	**28.54**
24	596.59	625.13	**28.54**
25	596.59	625.13	**28.54**
26	596.59	625.13	**28.54**
27	596.59	625.13	**28.54**
28	596.59	625.13	**28.54**
29	596.59	625.13	**28.54**
30	596.59	625.13	**28.54**

TIR= 13.99%

INDICADORES DE RENTABILIDAD FINANCIACION PROPIA

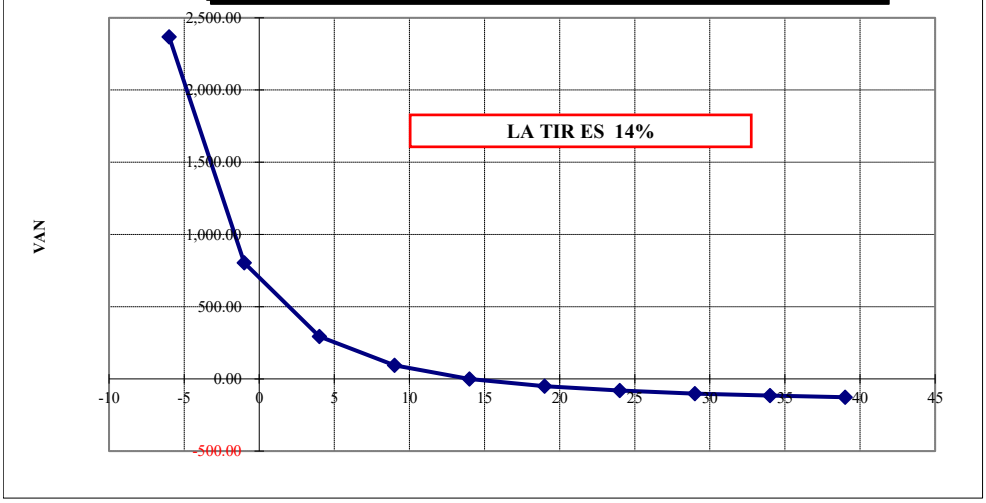
%	VAN	B/C
-6	**2,368.72**	**1.04**
-1	**804.41**	**1.04**
4	**293.56**	**1.03**
9	**93.24**	**1.01**
14	**-0.13**	**1.00**
19	**-50.59**	**0.98**
24	**-81.26**	**0.97**
29	**-101.62**	**0.95**
34	**-116.06**	**0.94**
39	**-126.82**	**0.93**

VAN al coc **10.00%** **69.07**

CONTROL DE LA TASA r

Incremento **5**

REPRESENTACION DE LA CURVA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 4: ANALISIS DE SENSIBILIDAD

FINANCIACION PROPIA

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Variación de costes y beneficios expresada en %

HIPOTESIS DE COSTES

INVERSION	COSTE-1	COSTE-2	COSTE-3	COSTE-4	COST-FIN.
-100	-29	0	89	0	0

HIPOTESIS DE BENEFICIOS

BENEF-1	BENEF-2	BENEF-3	BENEF-4	BENEF-5	BENF-FIN.
-5	-5	-5	0	0	0

AÑO	COSTES	BENEFICIOS	FLUJO
O	0.00	0.00	**0.00**
1	573.07	588.38	**15.31**
2	573.07	588.38	**15.31**
3	573.07	588.38	**15.31**
4	573.07	588.38	**15.31**
5	573.07	588.38	**15.31**
6	573.07	588.38	**15.31**
7	573.07	588.38	**15.31**
8	573.07	588.38	**15.31**
9	573.07	588.38	**15.31**
10	573.07	588.38	**15.31**
11	573.07	588.38	**15.31**
12	573.07	588.38	**15.31**
13	573.07	588.38	**15.31**
14	573.07	588.38	**15.31**
15	573.07	588.38	**15.31**
16	573.07	588.38	**15.31**
17	573.07	588.38	**15.31**
18	573.07	588.38	**15.31**
19	573.07	588.38	**15.31**
20	573.07	588.38	**15.31**
21	573.07	588.38	**15.31**
22	573.07	588.38	**15.31**
23	573.07	588.38	**15.31**
24	573.07	588.38	**15.31**
25	573.07	588.38	**15.31**
26	573.07	588.38	**15.31**
27	573.07	588.38	**15.31**
28	573.07	588.38	**15.31**
29	573.07	588.38	**15.31**
30	573.07	588.38	**15.31**

TIR= #¡NUM!

INDICADORES DE RENTABILIDAD FINANCIACION PROPIA

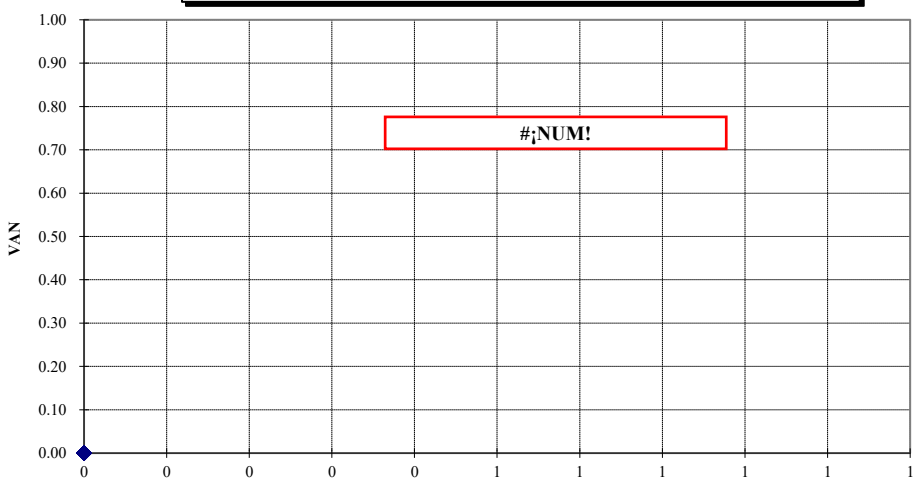
%	VAN	B/C
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**
#¡NUM!	**#¡NUM!**	**#¡NUM!**

VAN al coc **10.00%** **144.35**

CONTROL DE LA TASA r

Incremento **5**

REPRESENTACION DE LA CURVA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



EVALUACION FINANCIERA

ESCRIBIR TITULO

HOJA Nº 3: INDICADORES DE EVALUACION

ESTRUCTURA: FINANCIACION PROPIA

AÑO	COSTES	BENEFICIOS	FLUJO
O	200.00	0.00	-200.00
1	596.59	619.35	22.76
2	596.59	619.35	22.76
3	596.59	619.35	22.76
4	596.59	619.35	22.76
5	596.59	619.35	22.76
6	596.59	619.35	22.76
7	596.59	619.35	22.76
8	596.59	619.35	22.76
9	596.59	619.35	22.76
10	596.59	619.35	22.76
11	596.59	619.35	22.76
12	596.59	619.35	22.76
13	596.59	619.35	22.76
14	596.59	619.35	22.76
15	596.59	619.35	22.76
16	596.59	619.35	22.76
17	596.59	619.35	22.76
18	596.59	619.35	22.76
19	596.59	619.35	22.76
20	596.59	619.35	22.76
21	596.59	619.35	22.76
22	596.59	619.35	22.76
23	596.59	619.35	22.76
24	596.59	619.35	22.76
25	596.59	619.35	22.76
26	596.59	619.35	22.76
27	596.59	619.35	22.76
28	596.59	619.35	22.76
29	596.59	619.35	22.76
30	596.59	619.35	22.76

TIR= 10.86%

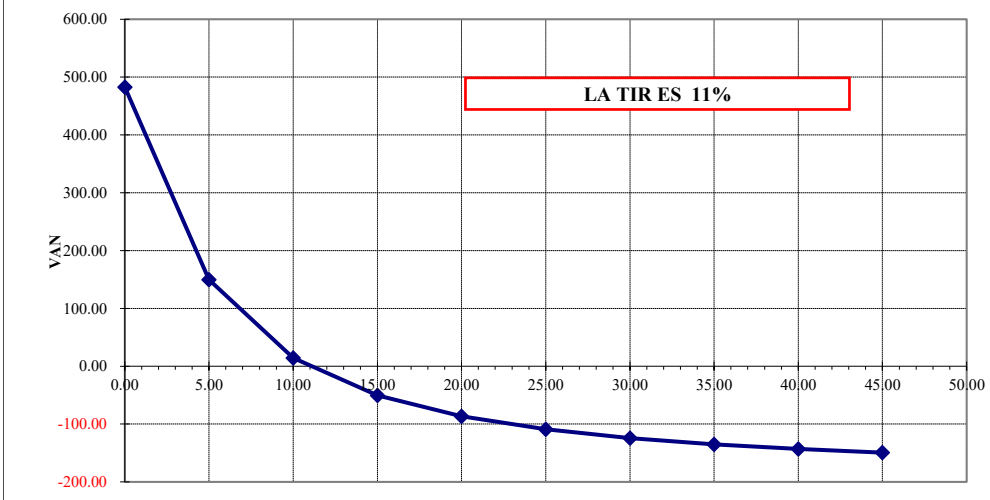
INDICADORES DE RENTABILIDAD
FINANCIACION PROPIA

%	VAN	B/C
0.00	482.80	1.03
5.00	149.88	1.02
10.00	14.56	1.00
15.00	-50.56	0.99
20.00	-86.68	0.97
25.00	-109.07	0.96
30.00	-124.16	0.94
35.00	-134.98	0.93
40.00	-143.10	0.92
45.00	-149.42	0.90

CONTROL GRAFICO
Increment. **3.00**

VAN al coc **0.05** **149.88**

REPRESENTACION DE LA CURVA DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



Trabajo de Fin de Grado

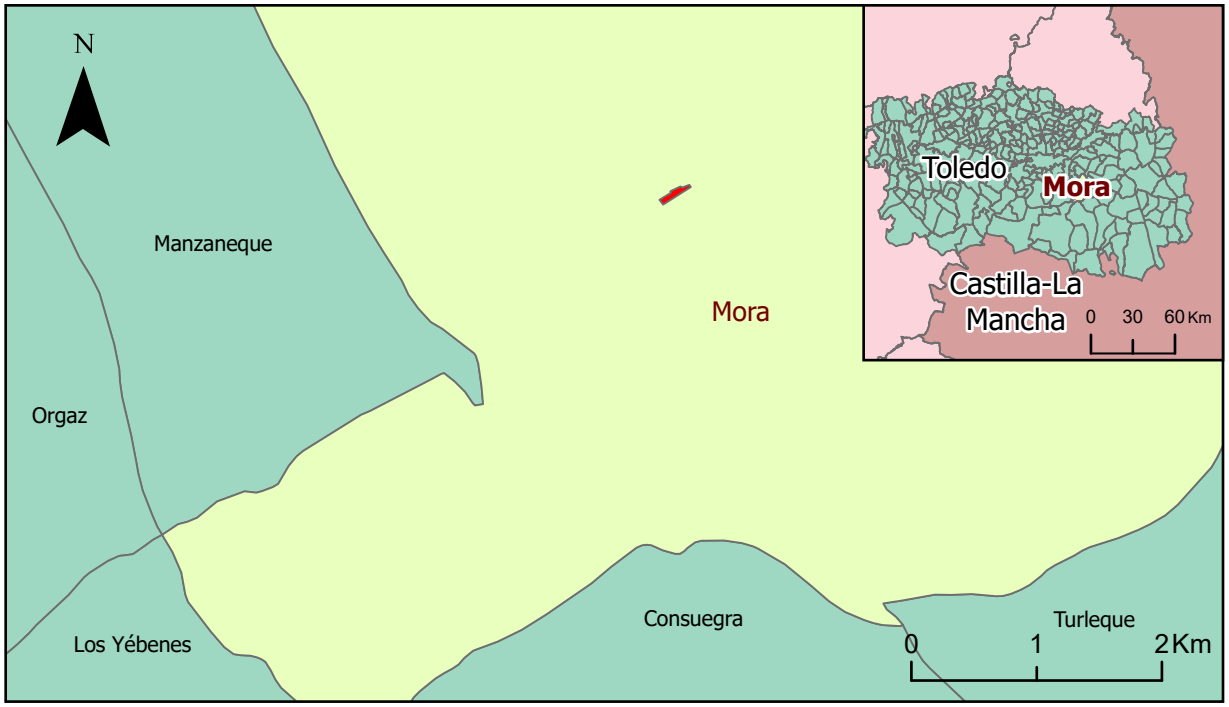
Evaluación de la germinación de Camelina sativa y diseño de un cultivo experimental de 1,16 ha en Mora (Toledo)

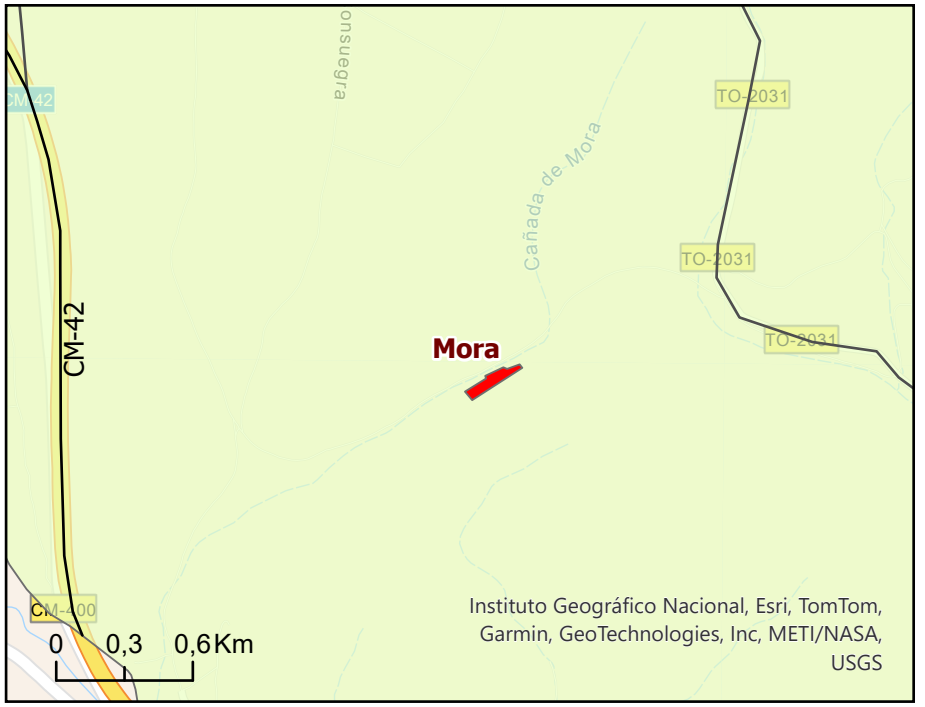
Anejo VI:

Mapas y Planos

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ingeniería Agroambiental





LEYENDA

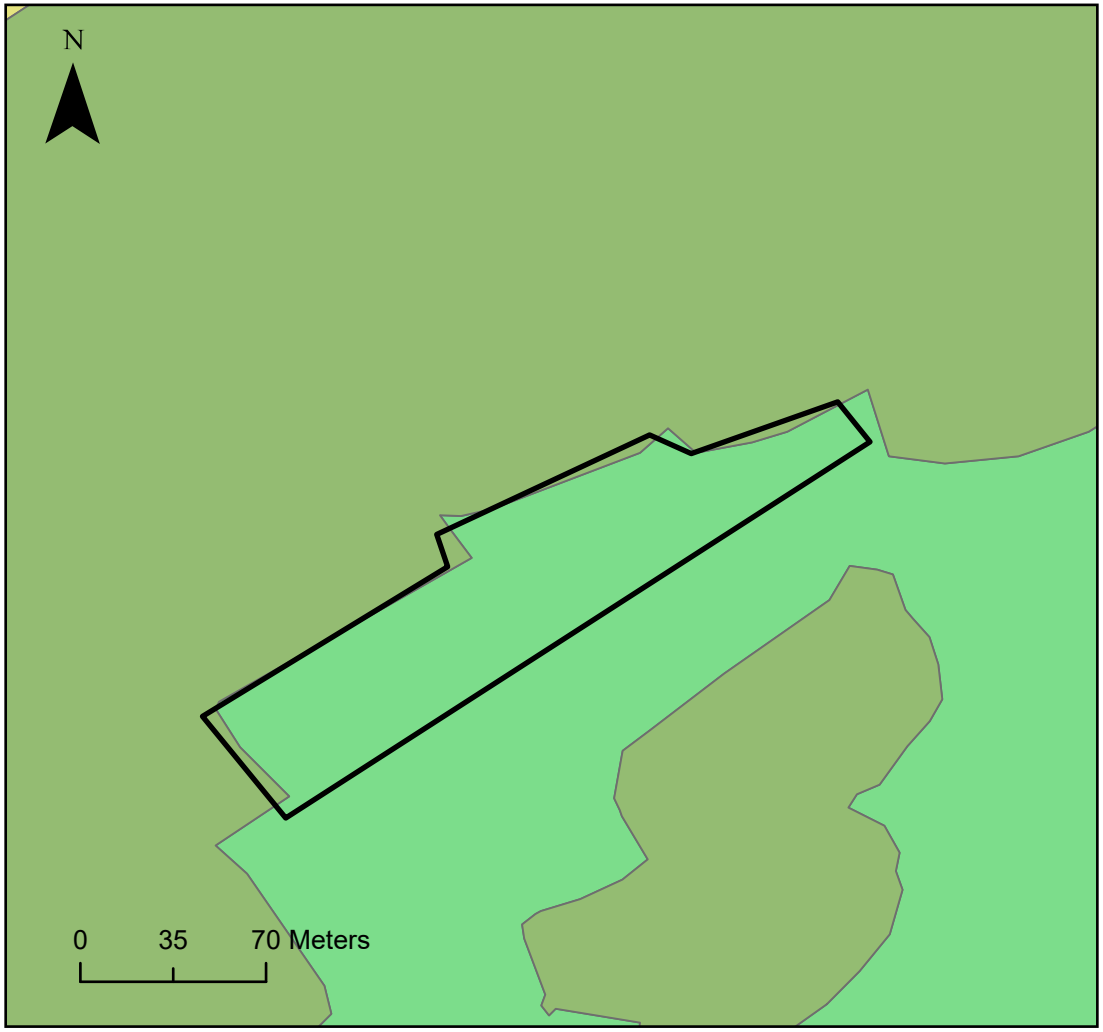
- Parcela
- Municipio de la Mora
- Municipios de Toledo
- Toledo
- Castilla La Mancha

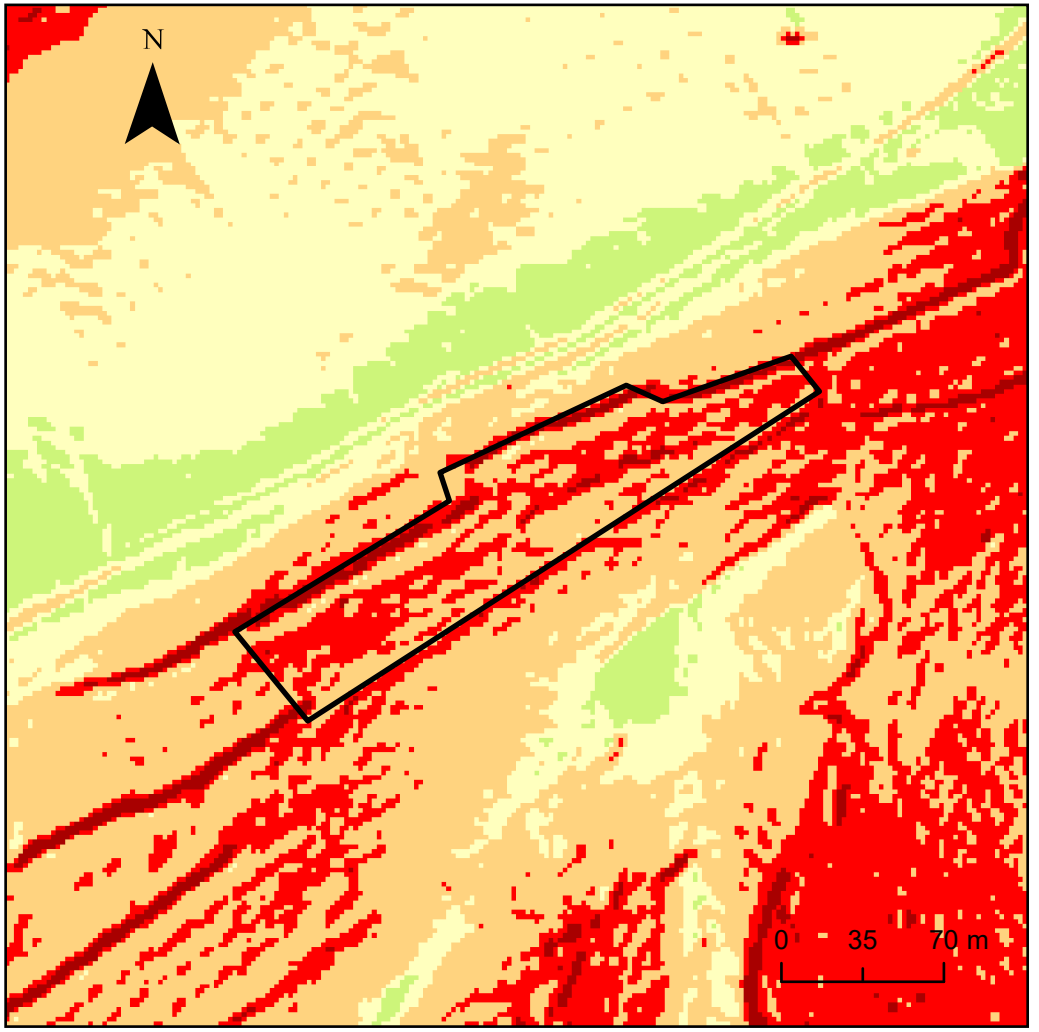
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaría y de Biosistemas

Mapa de localización de la parcela de estudio (45107A023000150000MK) en el término municipal de Mora, Toledo

Autor: Alae Zaari Assadek

Fecha:	Fuente:	Proyección:
10 de Mayo de 2025	Elaboración propia a partir de los datos del **Instituto Geográfico Nacional (IGN)**	ETRS89 HUSO 30





LEYENDA 1

- Parcela
- Bosque de frondosas
- Bosque mixto
- Olivar

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaría y de Biosistemas

Mapa de ocupación y pendiente del suelo de la parcela de estudio en el término municipal de Mora, Toledo

Autor: Alae Zaari Assadek

Fecha:	Fuente:	Proyección:
10 de Mayo de 2025	Instituto Geográfico Nacional (IGN)	ETRS89 HUSO 30

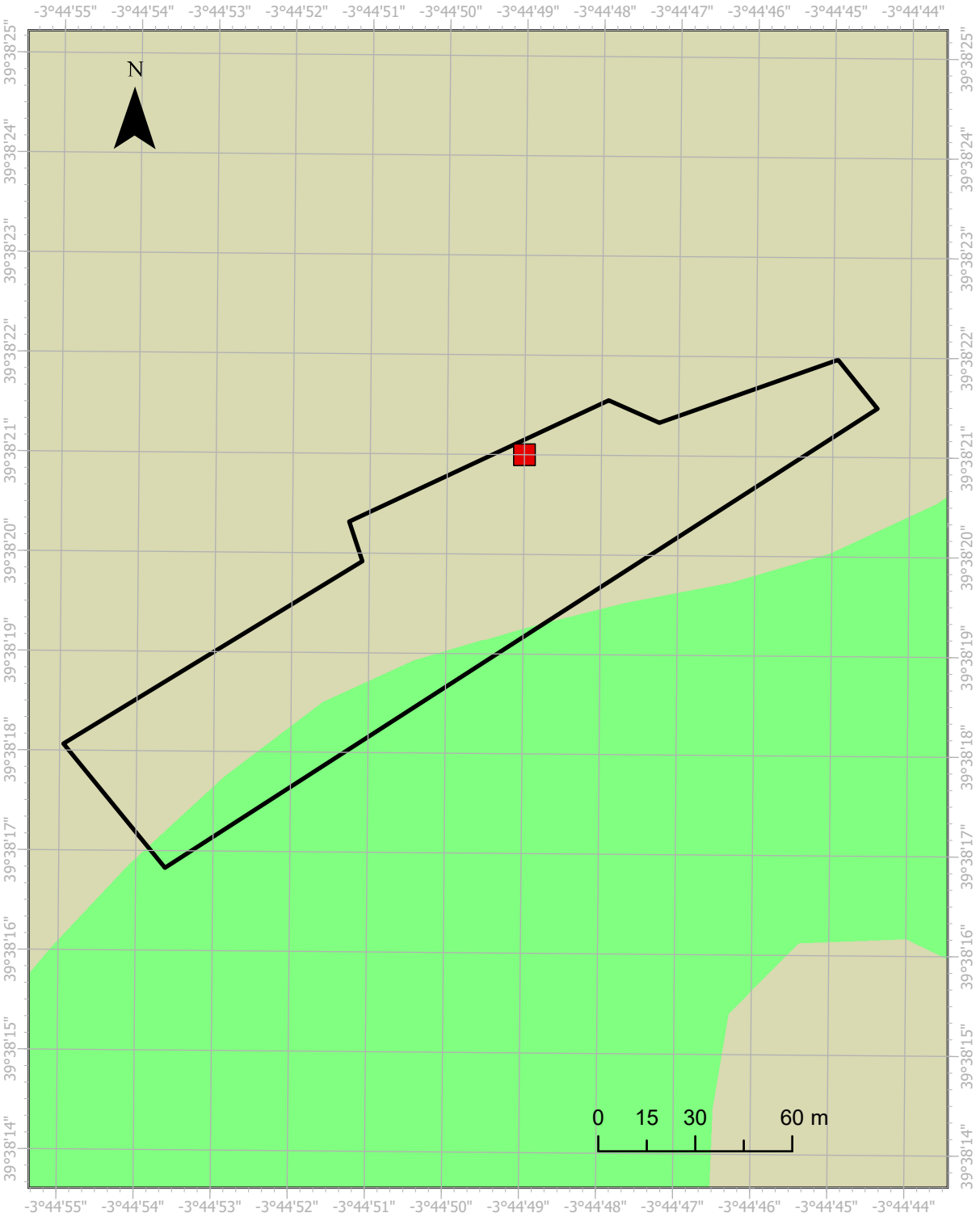
LEYENDA 2

Parcela

Parcela

Pendiente (%)

≤5% 5-10% 10-20% 20-30% >30%



LEYENDA

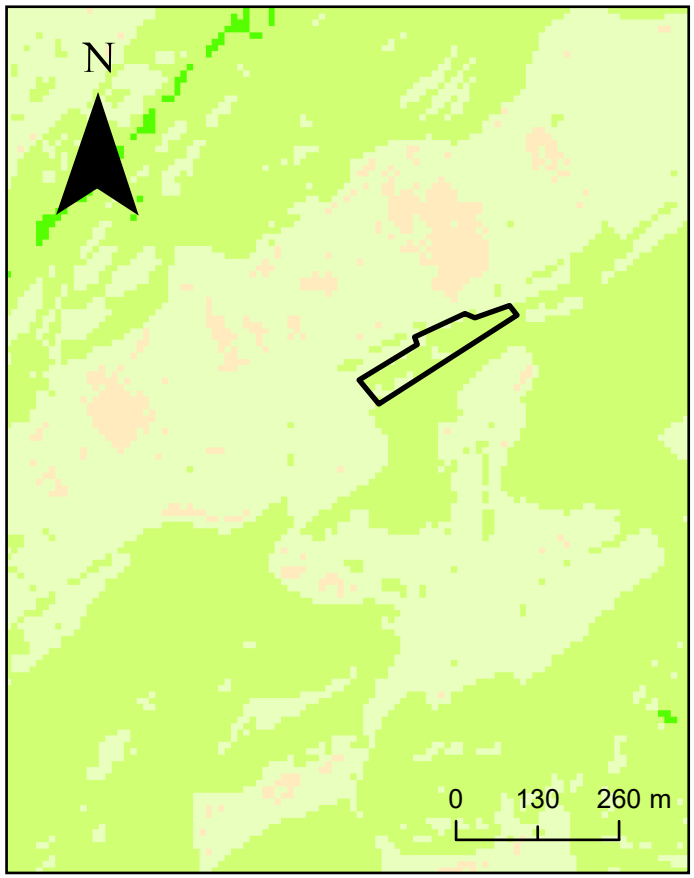
- Parcela
- Calicata S042
- Cantos, gravas y bloques en matriz arcillo-arenosa rojiza. Encostramientos carbonatados locales.
- Cuarcitas blanquecinas en bancos gruesos. Cuarcita Armoricana

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

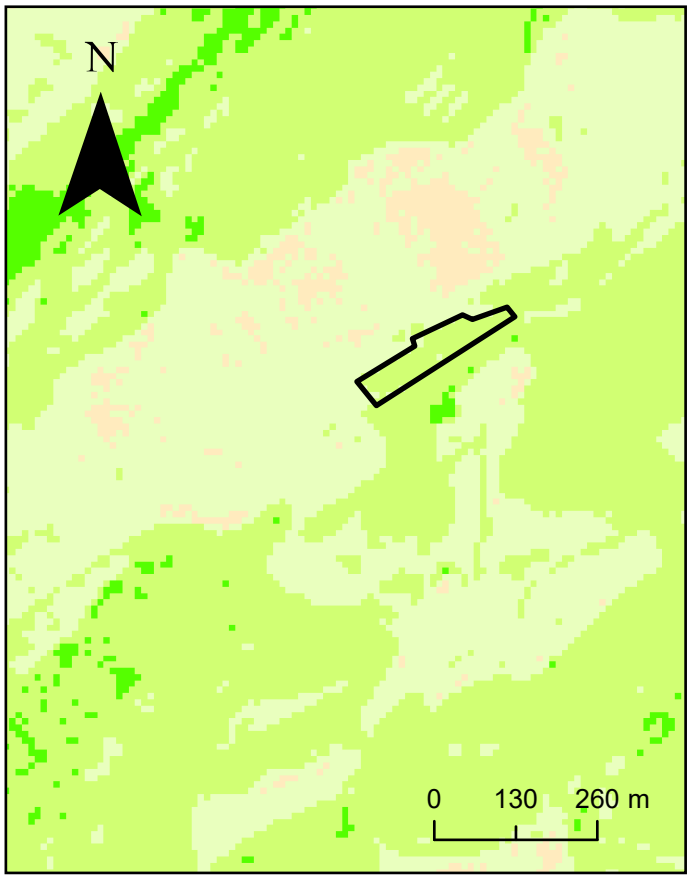
Mapa de geología de la parcela

Autor: Alae Zaari Assadek

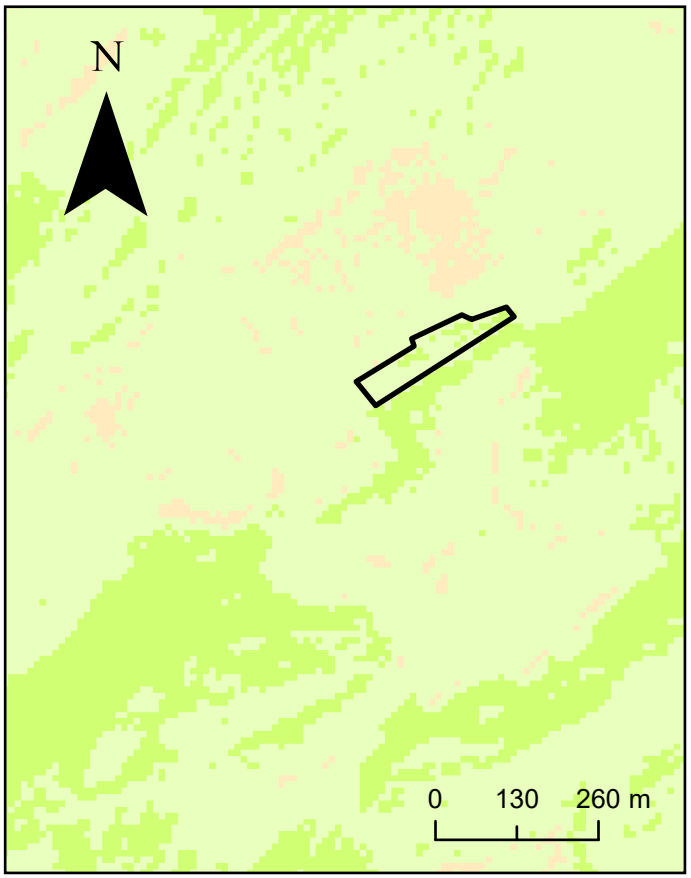
Fecha:	Fuente:	Proyección:
15 de Julio de 2025	Elaboración propia a partir de los datos del **Cartografía del IGME**	ETRS89 HUSO 30



ABRIL 2025



ABRIL 2024



ABRIL 2023

LEYENDA

Parcela

Parcela

NDVI

-0,354 - 0

0,001 - 0,1

0,101 - 0,25

0,251 - 0,4

0,401 - 0,6

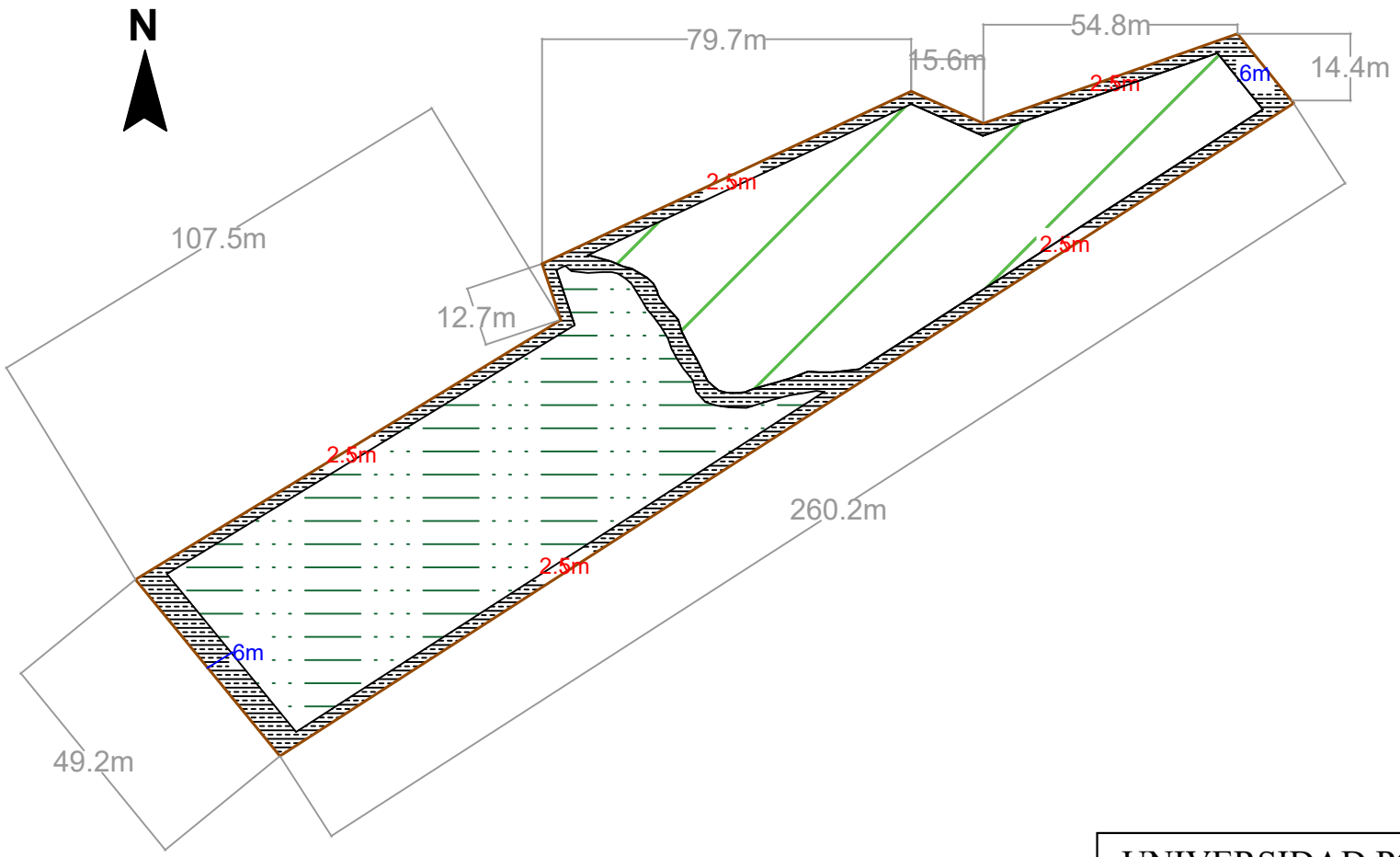
0,601 - 1

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaría y de Biosistemas

Análisis multitemporal del NDVI de la parcela experimental

Autor: Alae Zaari Assadek		Escala: 1:12.054
Fecha: 10 de Mayo de 2025	Fuente: Copernicus Browser	Proyección: ETRS89 HUSO 30



LEYENDA

Superficie total	1.16 ha	Superficie no cultivable	0.2 ha
Superficie útil	0.96 ha	Parcela	Desfases
0.5113 ha	0.4521 ha	Margen lateral: 2.5 m Cabecera: 6m	

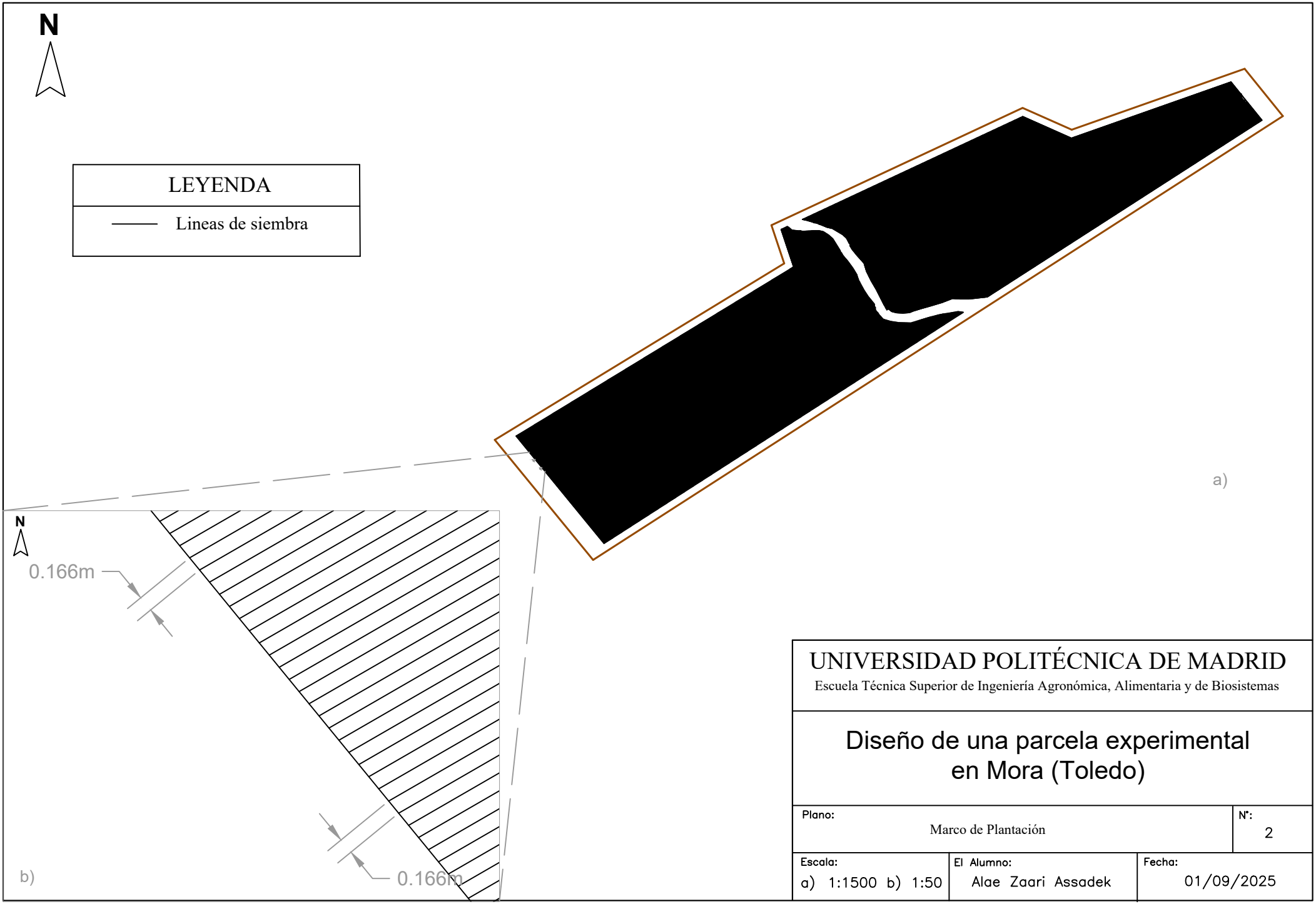
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

Diseño de una parcela experimental en Mora (Toledo)

Plano:	N°:
Plano General de la parcela	1

Escala:	Autor:	Fecha:
1:1500	Alae Zaari Assadek	01/09/2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

Diseño de una parcela experimental en Mora (Toledo)

Plano:	Nº:
Marco de Plantación	2

Escala:	El Alumno:	Fecha:
a) 1:1500 b) 1:50	Alae Zaari Assadek	01/09/2025