



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
AGRONÓMICA**

*Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal
ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada
de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.*

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Autor: Verónica Mercado Vázquez

**Tutor: Tomás Ramón Herrero Tejedor y
Alejandra Ezquerro Canalejo**

Febrero de 2025



AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Máster es fruto del esfuerzo y constancia, pero sobre todo del apoyo de muchas personas, sin las cuales esto no hubiera sido posible. Es por ello que me gustaría agradecer:

A mis tutores Tomás Herrero y Alejandra Ezquerra por confiar en mí en la elaboración de este trabajo y por enseñarme tanto, así como al grupo de investigadores que forman parte del subproyecto que son Enrique Pérez, Serafín López-Cuervo, Julián Aguirre y José Ramón González, ha sido un placer poder aprender de vuestros conocimientos.

A los profesores que han formado parte de mi recorrido académico, quienes, con su compromiso y pasión por la enseñanza, han contribuido a mi crecimiento personal y profesional, y me ha permitido enfrentar retos como este.

A mis compañeros y amigos por formar parte de esta etapa y por su apoyo incondicional. Gracias por los momentos compartidos tanto dentro como fuera del aula.

Por último, pero no menos importante, a mi familia, especialmente a mis padres y mi hermana, por apoyarme desde el primer momento y por ser el motor de mi vida. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la disciplina, porque gracias a vosotros estoy donde estoy hoy.



RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster se enmarca dentro del proyecto de investigación ACICORK, al que contribuye mediante la generación de información clave para su desarrollo. El estudio se fundamenta en la integración de datos geoespaciales obtenidos a partir de multisensores (RGB, LiDAR y multiespectrales) a bordo de drones, combinados con datos de posicionamiento GNSS de alta precisión.

Estos datos han sido procesados a una escala local de alta resolución con el objetivo de estimar la biomasa generada en el alcornocal, proporcionando una base sólida para el desarrollo de un sistema de monitoreo in situ. Dicho sistema permitirá controlar de forma automática y en tiempo real la evolución del arbolado y la producción de corcho, optimizando la gestión de estos ecosistemas.

El análisis de la información geoespacial ha permitido desarrollar, calibrar y validar modelos geovisuales avanzados, tanto numéricos como gráficos, orientados a simular escenarios de gestión y monitoreo de la producción de corcho. Además, se ha considerado su aplicación en el control precoz de enfermedades que afectan al alcornocal, como la seca, contribuyendo a una gestión forestal más proactiva y sostenible.

La investigación se ha centrado en una zona piloto ubicada en Calzada de Oropesa (Toledo), con el objetivo final de diseñar un Sistema de Información Geográfica (SIG) que facilite la ordenación y gestión sostenible del alcornocal. Este sistema está enfocado en la estimación precisa de biomasa y parte aérea, así como en la mejora de las prácticas de manejo forestal en el contexto del cambio climático.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Justificación.....	12
2 ANTECEDENTES.....	14
2.1 Descripción general del alcornoque (<i>Quercus suber L.</i>).....	14
2.1.1 Características botánicas del alcornoque	15
2.1.2 Distribución de los alcornocales	17
2.1.3 Producción corcho	19
3 ÁREA DE ESTUDIO.....	20
3.1 Estudio edafológico	22
3.2 Climatología	24
3.2.1 Introducción	24
3.2.2 Temperatura	24
3.2.3 Régimen de heladas.....	25
3.2.4 Precipitación y humedad relativa	26
3.2.5 Clasificación climática.....	27
4 OBJETIVOS.....	31
5 MATERIALES Y RECURSOS.....	32
5.1 Equipo GNSS RTK.....	32
5.2 Dendrómetros de banda	33
5.3 Dendrómetro potenciómetro	33
5.4 Dispositivo Coveless CQ05	34
5.5 DJI Matrice 300 RTK (UAV)	34
5.6 Cámara RGB (UAV)	35
5.7 Sensor LiDAR.....	35
5.8 Sensor multiespectral Altum PT.....	36
5.9 Medidor Laser PENTAX M-100	36
5.10 Tratamiento informático de los datos.....	37



6	METODOLOGÍA	38
6.1	Metodología LiDAR (Light Detection And Ranging)	40
6.2	Planificación de vuelo	41
6.3	Procesamiento del vuelo.....	43
6.4	Adquisición de datos	43
6.4.1	Adquisición de datos en campo	43
6.4.2	Adquisición de datos de los diámetros (dendrómetros de banda)	45
6.4.3	Adquisición de datos del vehículo aéreo no tripulado (UAV)	47
6.5	Tratamiento de los datos	48
6.5.1	Delineación de copas de los árboles.....	49
6.6	Preprocesamiento y procesamiento de datos de la nube de puntos.....	50
6.6.1	Filtrado	50
6.6.2	Reclasificación	51
6.6.3	Normalización.....	53
6.6.4	Asociación de los datos.....	54
6.7	Imágenes y obtención de índices de vegetación	59
7	RESULTADOS	62
7.1	Estimación de la biomasa a partir de la ecuación alométrica.....	62
7.2	Estimación de la biomasa a partir de la densidad y la altura	64
7.3	Análisis de los resultados	68
7.3.1	Relación entre el diámetro y la biomasa.....	68
7.3.2	Relación entre la altura y la biomasa	69
7.3.3	Análisis de regresión y comparación de modelos	70
8	EVALUACIÓN ECONÓMICA	72
8.1	Costes del proyecto	72
8.1.1	Costes de material.....	72
8.1.2	Costes de mano de obra.....	73
8.1.3	Costes de personal.....	73
8.1.4	Costes totales	74



8.2 Ingresos	74
9 CONCLUSIONES	76
10 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	77
11 BIBLIOGRAFÍA	80
ANEJO 1	83
ANEJO 2	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía alcornoque de Dehesa Boyal. Fuente: elaboración propia..	14
Figura 2. Bellota de un alcornocal de la Dehesa Boyal. Fuente: elaboración propia	14
Figura 3. Partes de un tallo secundario típico al final del segundo año de crecimiento secundario. Fuente: (Megías, Molist, & A.Pombal, 2023)	16
Figura 4. Fotografías del alcornocal de la Dehesa Boyal. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 5. Mapa de distribución de Quercus suber en Europa. Fuente: Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (basado en el mapa Euforgen)	18
Figura 6. Gráfica de producción de corcho representado por media anual de toneladas. Fuente: FAO, 2010.....	19
Figura 7. Mapa de localización de la finca situada en Calzada de Oropesa. Fuente: elaboración propia ArcGIS Pro.....	21
Figura 8. Evolución de temperaturas medias, máximas y mínima. Fuente: elaboración propia.....	24
Figura 9. Precipitaciones y humedad relativa media mensual. Fuente: elaboración propia	26
Figura 10. Diagrama ombrotérmico. Fuente: elaboración propia.	27
Figura 11. Clasificación del tipo de invierno según Papadakis. Fuente: Monografía "Metodología para la elaboración de estudios aplicados de climatología".....	30
Figura 12. Antena GNSS inteligente compacta "Leica Zeno FLX100 plus". Fuente: elaboración propia.....	32

Figura 13. Detalle de los dendrómetros de banda instalados. A la izquierda se muestra el muelle y a la derecha la zona de medida. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales).....	33
Figura 14. HOBO UX120-006M con sensor de posición. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales).	33
Figura 15. Características de DJI Matrice 300 RTK. Fuente: (Ibericadron).....	34
Figura 16. MATRICE 300 RTK. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 17. Sensor Zenmuse P1. Fuente: elaboración propia.....	35
Figura 18. Sensor DJI Zenmuse L1. Fuente: elaboración propia.....	35
Figura 19. Cámara MicaSense RedEdge-MX: Multiespectral. Fuente. elaboración propia	36
Figura 20. Medidor Laser. Fuente: https://mendilurposition.com/producto/medidor-laser-disto-d2-leica/	36
Figura 21. Esquema de la metodología empleada	39
Figura 22. Componentes de un sistema LiDAR. Fuente: https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sistema-lidar/	41
Figura 23. Ejemplo de plan de vuelo para LiDAR en la parcela de estudio. Fuente: elaboración propia.....	42
Figura 24. Detalle de la numeración de cada uno de los alcornoques. Fuente: elaboración propia.....	43
Figura 25. Inventario geolocalizado de todos los alcornoques Quercus Suber L. Fuente: elaboración propia.....	44
Figura 26. Recogida de datos para el inventario 20 de mayo de 2024 con la antena GNSS "Leica Zeno FLX100 plus"	45
Figura 27. Rodaja de alcornoque en el que se muestra la colocación de los electrodos que componen la máquina Coveless. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2022).....	46
Figura 28. Nube de puntos en tiempo real (mostrando la reflectividad).....	48
Figura 29. Creación de capa polígonos con la delimitación de cada alcornoque conforme al inventario georreferenciado	49
Figura 30. Pasos de procesamiento de la nube de puntos 3D ALS-UAV	50
Figura 31. Clasificación por defecto de la nube de puntos obtenida por el sensor LiDAR.....	51



Figura 32. Esquema de la clasificación que se va a realizar para poder obtener el modelo digital del terreno y el de superficies	52
Figura 33. Reclasificación de la nube de puntos	52
Figura 34. Visualización en ArcGIS Pro de los puntos del terreno (suelo) tras la reclasificación	52
Figura 35. Visualización en ArcGIS Pro de los puntos que corresponden a los alcornoques (vegetación alta) tras la reclasificación.....	52
Figura 36. Visualización en ArcGIS Pro de los puntos del terreno y los que pertenecen a los alcornoques con los valores de altura	53
Figura 37. Visualización en ArcGIS Pro a la izquierda del Modelo Digital del Terreno y la derecha del Modelo Digital de Superficies.....	54
Figura 38. Creación máscaras ArcGIS Pro	55
Figura 39. Plano de máscaras asociado a la altura máxima de cada alcornoque. Anejo 2, plano 4.....	56
Figura 40. Plano de máscaras asociado a la superficie de cada alcornoque. Anejo 2, plano 5.	57
Figura 41. Plano de máscaras asociado al diámetro de cada alcornoque. Anejo 2, plano 6.	58
Figura 42. NDVI de la finca de estudio perteneciente al día 20 de mayo de 2024. Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG 25830). Fuente: elaboración propia. ArcGIS Pro.....	59
Figura 43. NDRE de la finca de estudio perteneciente al día 20 de mayo de 2024. Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG 25830). Fuente: elaboración propia. ArcGIS Pro.....	60
Figura 44. GNDVI de la finca de estudio perteneciente al día 20 de mayo de 2024. Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG 25830). Fuente: elaboración propia. ArcGIS Pro.....	61
Figura 45. Valores de biomasa estimados por medio de la ecuación alométrica y por fórmula general.....	67
Figura 46. Gráfico de dispersión donde se pueden observar las correlaciones entre el diámetro con los valores de biomasa obtenidos a partir de las dos ecuaciones. Fuente: Excel.....	68
Figura 47. Gráfico de dispersión donde se pueden observar las correlaciones entre la altura con los valores de biomasa obtenidos a partir de las dos ecuaciones. Fuente: Excel.....	69



Figura 48. Valores de diámetro a 1,3 metros expresado en cm y valores de altura en metros.....	70
Figura 49. Alcornocales muertos causado por la enfermedad de La Seca	78
Figura 50. Tocones y restos de alcornocales afectados por La Seca que han provocado la muerte	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica del alcornoque con la descripción de las principales características. Fuente: ("Ficha técnica del alcornoque, 2015").....	14
Tabla 2. Área de bosque de alcornoque clasificado por países. Fuente: https://aecork.com/wp-content/uploads/2017/11/CORK-Dossier-Medio-Ambiente.pdf	17
Tabla 3. Coordenadas en los dos sistemas de referencia (ETRS89 y WGS84) de la finca de estudio	20
Tabla 4. Datos edafológicos. Fuente: Estudio sobre biometría y morfología del sistema radical de una repoblación de alcornoque (<i>Quercus suber</i> L.) en el T.M. de Calzada de Oropesa (Toledo).....	23
Tabla 5. Datos edafológicos (nutrientes). Fuente: Estudio sobre biometría y morfología del sistema radical de una repoblación de alcornoque (<i>Quercus suber</i> L.) en el T.M. de Calzada de Oropesa (Toledo).....	23
Tabla 6. Temperaturas medias. Fuente: SIAR	24
Tabla 7. Período libre de heladas. Fuente: SIAR	25
Tabla 8. Precipitación y humedad relativa. Fuente: SIAR	26
Tabla 9. Tipos de invierno según Papadakis. Fuente: Monografía (Almorox Alonso, de Antonio García, & Saa Requejo, 2004)	28
Tabla 10. Tipos de invierno según Papadakis. Fuente: Monografía (Almorox Alonso et al., 2004).....	29
Tabla 11. Principales variables que caracterizan los alcornoques. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2022).....	46
Tabla 12. Resumen de parámetros de los vuelos	48
Tabla 13. Valor de los parámetros de la función (a y b), del coeficiente de determinación ajustado (R ²) y el error estándar de la estimación (SEE) para <i>Quercus suber</i> y fracción de biomasa	64



Tabla 14. Resultados obtenidos a partir de dos ecuaciones (general y alométrica) a partir de datos de altura (obtenidos de la nube de puntos del vuelo LiDAR) y la altura (obtenida de los dendrómetros de banda)	66
Tabla 15. Relación entre el diámetro y la biomasa en dos ejemplares con diámetros muy diferenciados	68
Tabla 16. Relación entre la altura y la biomasa, en un caso donde al aumentar la altura no aumenta la biomasa.....	69
Tabla 17. Análisis de regresión de ambos modelos. Fuente: Excel	70
Tabla 18. Costes de instrumentación para la toma de datos y desarrollo del proyecto.....	72
Tabla 19. Costes de manutención de personal incluyendo transporte y comida	73
Tabla 20. Costes de personal del grupo de investigación.....	73
Tabla 21. Costes totales	74



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El corcho es un material biológico que sustenta una cadena de valor integrada desde el bosque hasta la industria, con un importante impacto económico, social y ecológico en las regiones donde se produce y procesa. España es el segundo mayor productor mundial de corcho, después de Portugal.

El corcho es una materia prima renovable y sostenible, con unas propiedades inherentes únicas que lo hacen adecuado para una amplia gama de aplicaciones. No sólo se utiliza para el cierre de vinos, sino también en diferentes sectores donde es una alternativa a las materias primas de origen fósil y no renovables. El uso del corcho contribuye a la conservación de los alcornoques (*Quercus suber L.*) que están muy bien adaptados a las regiones semiáridas donde previenen la desertificación, dan lugar a otros beneficios ambientales y son un hábitat importante para muchas especies de flora y fauna. Además, los alcornoques contribuyen significativamente al desarrollo rural de las zonas donde se ubican, generando oportunidades de empleo. Sin embargo, los alcornoques se ven amenazados por numerosos peligros, la mayoría de los cuales se ven agravados por el cambio climático, como la escasa regeneración natural, el envejecimiento de los alcornoques y la enfermedad del decaimiento del roble ibérico, entre otros. Para hacer frente a esta situación de vulnerabilidad de los alcornoques, se propone seguir el enfoque de silvicultura climáticamente inteligente (SIC) que considera toda la cadena de valor y se centra en tres pilares: mitigación, para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero a la atmósfera, adaptación, para promover la resiliencia de los bosques al cambio climático, y dimensión social, para aumentar de forma sostenible la productividad forestal y el bienestar económico sobre la base de la silvicultura (Sánchez González, Ezquerro Canalejo, Herrero Tejedor, & Cancho Godoy, 2022).

La persistencia de los alcornoques enfrenta múltiples amenazas, incluyendo la escasa regeneración natural, el envejecimiento de los árboles, la ICOD (Síndrome del decaimiento del alcornoque), plagas y enfermedades, malas prácticas selvícolas, falta de trabajadores capacitados para el descorche y un aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales.



Además, el cambio climático agrava estos problemas al elevar las temperaturas y alterar los patrones de precipitación, lo que impacta negativamente en el crecimiento y la mortalidad de los árboles, así como en la producción de corcho. Los alcornocales establecidos en España entre 1993 y 2000, a través de programas de reforestación, corren un mayor riesgo, ya que muchos se encuentran en ubicaciones no óptimas para su desarrollo.

El proyecto abordará la implantación y mejora de herramientas de seguimiento y planificación, fundamentales para la gestión forestal, la producción de corcho y la enfermedad del decaimiento del roble causada por *Phytophthora cinnamomi* teniendo en cuenta diferentes sistemas de producción y utilizando técnicas geoespaciales (M. d. I. O. Sánchez González, Ezquerro Canalejo, & Herrero Tejedor, 2022).

2 ANTECEDENTES

2.1 Descripción general del alcornoque (*Quercus suber L.*)

El alcornoque se distingue por su corteza gruesa y rugosa, conocida como corcho, que presenta multitud de fisuras. Sus hojas, de textura dura y forma ovalada, muestran un color verde intenso en la parte superior, mientras que el envés tiene un tono blanquecino debido al vello que las cubre. Su fruto es la bellota, parcialmente recubierta en la base por una cúpula formada por escamas alargadas y poco compactas. A continuación, en la tabla 1 se muestra la ficha técnica del alcornoque.



División	Espermatofitas	
Subdivisión	Angiospermas	
Clase	Dicotiledóneas	
Orden	Fagales	
Familia	<i>Fagaceae</i> (Fagáceas)	
Especie	<i>Quercus suber L.</i>	
Sinónimos	<i>Q. occidentalis</i> Gay.	
Nombres vulgares	<p><u>Catalán</u>: alzina surera, surer, suro, que deriva del latín “suber” y coincide con el nombre que se le da al corcho.</p> <p><u>Euskera</u>: artelatza, tortix.</p> <p><u>Gallego</u>: corticeira, sobreiro, sobriro.</p> <p><u>Portugués</u>: sobreiro, sobro.</p> <p><u>Árabe/ bereber</u>: fersi, fernan, chuber, dlém.</p> <p><u>Italiano</u>: sughera.</p> <p><u>Francés</u>: chène liège, surier.</p> <p><u>Inglés</u>: cork oak, cork tree.</p>	

Figura 1. Fotografía alcornoque de Dehesa Boyal.
Fuente: elaboración propia

Figura 2. Bellota de un alcornoque de la Dehesa Boyal. Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Ficha técnica del alcornoque con la descripción de las principales características. Fuente: (“Ficha técnica del alcornoque, 2015”)



El alcornoque es un ejemplo de especie longeva, de amplia distribución cuya conservación como tal no está en principio amenazada. No obstante, las diferentes estaciones en las que habita, la historia de sus poblaciones y el desconocimiento de su ecología, hacen que estas amenazas sean más crípticas y hayan permitido su extinción local o regional. Las estrategias de conservación de la especie deben priorizar el mantenimiento de su diversidad intraespecífica y de los procesos que la generan, como la introgresión con otras especies de *Quercus* (López de Heredia & Gil, 2006).

El objetivo principal que plantea la Conservación de Recursos Genéticos es salvaguardar el potencial evolutivo de las especies conservando su estructura y dinámica (Eriksson, 2000).

En las zonas templadas del planeta, la mayor parte de las especies forestales arbóreas se caracterizan por tener amplios rangos de distribución, ser alógamas, anemófilas, longevas y por formar bosques con baja diversidad específica.

Un ejemplo de especie arbórea de amplia distribución en los ecosistemas mediterráneos es el alcornoque (*Quercus suber L.*). Dado que forma poblaciones extensas en un amplio rango de distribución, el alcornoque no se considera amenazado de desaparición como especie. Precisamente esto hace que las amenazas sean más escasas y pasen desapercibidas si no se posee un conocimiento suficientemente cercano a la historia, ecología y dinámica de los alcornocales.

2.1.1 Características botánicas del alcornoque

El alcornoque es un árbol perenne y de porte robusto que puede llegar a los 25 metros de altura. Su copa es bastante amplia, aunque depende del espacio del que disponga y de la poda en caso de que se realizara.

Los alcornoques son árboles muy longevos que pueden llegar a vivir incluso 250 años, y pueden llegar a alcanzar un grosor de diámetro del tronco de 12 metros.

La corteza es suberosa, gruesa (hasta 15 cm o superior) y se encuentra muy agrietada longitudinalmente, donde se encuentra el corcho. Al corcho obtenido en la primera extracción del alcornoque se le denomina bornizo.

Se caracterizan por ser una de las especies más resistentes a los incendios en su estado natural (no descorchado) debido a su corteza que lo protege contra

enfermedades y fenómenos meteorológicos extremos como la sequía (Vericat Grau, Piqué Nicolau, & Serrada Hierro, 2012).

El corcho se forma a partir del felógeno, que a su vez genera felodermis hacia el interior y súber o felema hacia el exterior. La felema junto la felodermis se denomina peridermis, un tejido que protege tallos y raíces.

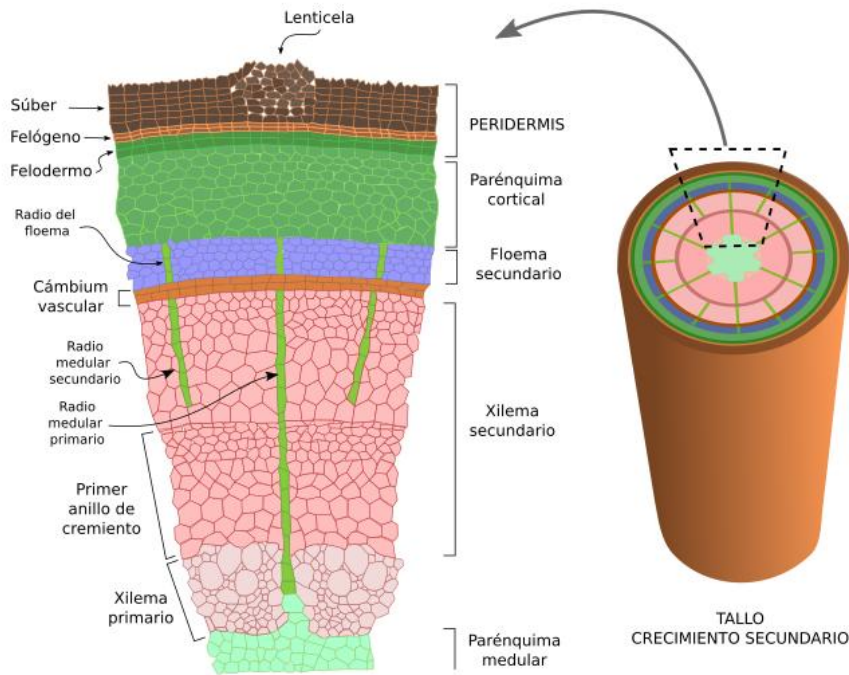


Figura 3. Partes de un tallo secundario típico al final del segundo año de crecimiento secundario. Fuente: (Megías, Molist, & A.Pombal, 2023)



Figura 4. Fotografías del alcornocal de la Dehesa Boyal. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Distribución de los alcornocales

- Superficie forestal en España

España posee 27,7 millones de hectáreas de superficie forestal según el INE (Instituto Nacional de Estadística), lo que representa el 54,8% del territorio nacional. Aunque es el tercer país de Europa en superficie forestal arbolada, su aprovechamiento de la biomasa forestal es bajo, siendo el octavo en utilización de madera para biomasa. El consumo per cápita de biomasa en España es significativamente menor que en otros países europeos como Finlandia. En 2017, la biomasa y sus derivados solo representaron el 2% de la producción de energía eléctrica en España (Urrechu Torres, 2021).

- Distribución a nivel mundial

De forma natural, se distribuye por el área occidental que bordean el mar Mediterráneo, llegando a las costas del Atlántico como se puede observar en la figura 5. Normalmente se sitúan en zonas con clima mediterráneo de influencia marítima debido a las necesidades específicas que tiene.

Área de bosque alcornocal

País	Área (hectáreas-ha)*	Porcentaje (%)
Portugal	736.775	34
España	574.248	27
Marruecos	383.120	18
Argelia	230.000	11
Túnez	85.771	4
Francia	65.228	3
Italia	64.800	3
Total	2.139.942	100

Tabla 2. Área de bosque de alcornocal clasificado por países. Fuente: <https://aecork.com/wp-content/uploads/2017/11/CORK-Dossier-Medio-Ambiente.pdf>



Mapa de distribución de *Quercus suber* L. en Europa

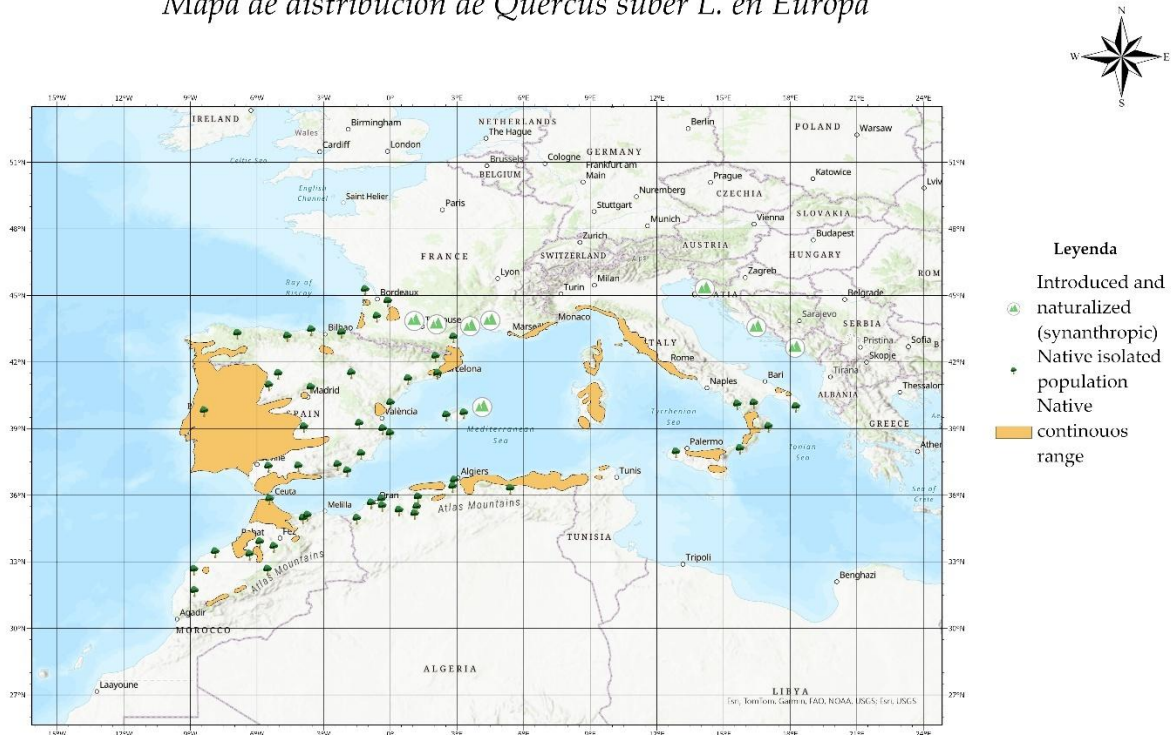


Figura 5. Mapa de distribución de *Quercus suber* en Europa. Fuente: Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (basado en el mapa Euforgen)

- Distribución en la Península Ibérica

La distribución actual de los alcornoques en la Península Ibérica es resultado de las fluctuaciones glaciales e interglaciales del Cuaternario, que fragmentaron su área original, concentrándose principalmente a lo largo de la cuenca Mediterránea. Existen dos grandes núcleos: uno en el occidente del Mediterráneo (oeste de la Península Ibérica, costa atlántica francesa y marroquí) y otro en la costa mediterránea (francesa, noroeste ibérico, islas mediterráneas, Península Itálica, Argelia y Túnez). En España, la evolución de los alcornoques ha sido influenciada por cambios climáticos y actividades humanas, lo que ha llevado a su agrupación en tres grandes áreas: cantábrica, interior continental y sur mediterránea (P.M. Díaz-Fernández, 1996).



- Régimen de propiedad de los alcornoques

Más del 90% de los alcornocales en la Península Ibérica están en manos privadas. Según el segundo Inventario Forestal Nacional (2IFN), durante el período 1986-1996, el alcornoque ocupaba en España 104.254,92 ha, de las cuáles 93.988,67 ha pertenecían a particulares. Este régimen de la propiedad dificulta el desarrollo de planes y estrategias de mejora o de conservación, y deja a la buena voluntad del propietario la evolución del monte. Así, la historia del monte mediterráneo muestra cambios constantes en su aprovechamiento en función de las necesidades de la sociedad, lo cual tiene un reflejo en la diversidad genética y la capacidad de adaptación del alcornoque frente a cambios ambientales (López de Heredia & Gil, 2006).

2.1.3 Producción corcho

La producción global de corcho es de 270.000 toneladas anuales, provenientes de 2,86 millones de hectáreas de alcornocales en siete países del Mediterráneo occidental. Portugal lidera con una producción de 158 kg por hectárea al año, seguido por España con 107 kg/ha/año. En contraste, Marruecos y Argelia producen solo 4 kg/ha/año y 2 kg/ha/año, respectivamente, aunque juntos tienen una superficie de alcornocales casi igual a la de Portugal. Italia, Francia y Túnez, con 287.000 ha de alcornocales, podrían aumentar significativamente su producción actual de 28.000 toneladas anuales con una mejor gestión. Esto sugiere que, con mejoras en la gestión, los alcornocales podrían abastecer a una industria embotelladora mucho mayor (Adena; Carolina Varela, 1999).

Producción de corcho

Producción media anual (ton.)*

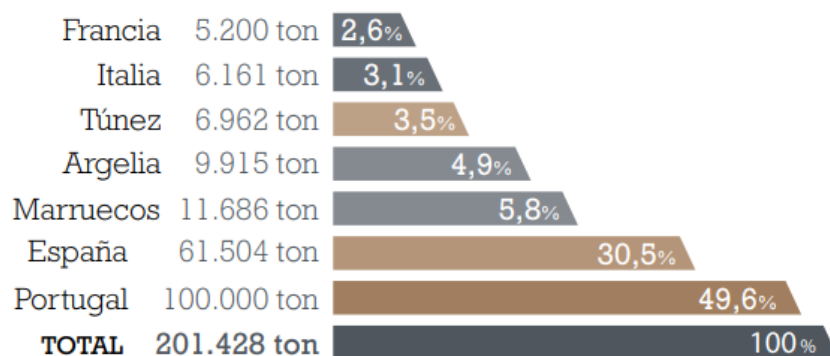


Figura 6. Gráfica de producción de corcho representado por media anual de toneladas. Fuente: FAO, 2010.

3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el municipio de Calzada de Oropesa (Toledo), en la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha. Pertenece a la comarca de La Campana de Oropesa que es históricamente parte de la comarca natural del Campo Arañuelo.

En el anejo 2, plano 1 se encuentra un mapa de localización más en detalle de la zona de estudio.

La finca se encuentra en el alcornocal categorizado como reserva natural Dehesa Boyal cuya superficie es de 15,99 ha. Se sitúa en la zona 30S y cuyas coordenadas UTM son 303322.00 m E (abscisa) y 4418565.00 m N (Norte) en el sistema de coordenadas ETRS89 (EPSG 25830).

Sistema de referencia	ETRS89	WGS84
Latitud		39°53'35.6" N
Longitud		5°21'44.8" W
Huso UTM	30N	
Coordenadas X (m)	303322.00 m	
Coordenadas Y (m)	4418565.00 m	
Altitud (m)	340	

Tabla 3. Coordenadas en los dos sistemas de referencia (ETRS89 y WGS84) de la finca de estudio



Figura 7. Mapa de localización de la finca situada en Calzada de Oropesa. Fuente: elaboración propia ArcGIS Pro



3.1 Estudio edafológico

El alcornoque tiene preferencia por suelos ácidos o neutros, con buena aireación y generalmente profundos y con alto volumen útil.

- Se han extraído los datos obtenidos en el año 2.000 de un TFM realizado en la misma finca situada en Calzada de Oropesa, Toledo, llamado “Estudio sobre biometría y morfología del sistema radical de una repoblación de alcornoque (*Quercus suber* L.) en el T.M. de Calzada de Oropesa (Toledo)” (Serrada Hierro & Serrada Redondo, 2001).

En cuanto a las características edáficas de la zona, se trata de un suelo arcilloso donde se realizó una calicata cerca a los alcornoques dando los siguientes resultados reflejados en la tabla 4 y 5.

Siendo:

PP: Perfil realizado sobre pies de máximo desarrollo

CIC: Capacidad de intercambio catiónico, en mEq/ 100g.

Na: Sodio, en mEq/ 100g.

K: Potasio, en mEq/100g.

Ca: Calcio, en mEq/100g.

Mg: Magnesio, en mEq/ 100g.

S: Suma de cationes

C/N: Relación Carbono Nitrógeno.

N: Nitrógeno total en %.

P: Fósforo asimilable en ppm.

K: Potasio asimilable en ppm.



Perfil	Horz	Prof (cm)	TF (%)	Are. (%)	Li. (%)	Arc. (%)	pH (agua)	CE mmhos/cm	MO (%)	CO ₃ Ca tot. (%)	CA (%)	Perme.	CRA mm/m
PP	Ap	0-30	98	59,8	28,18	12,02	5,84	17	0,74	0	0	4	216,94
	Bt	30-60	92	55,2	29,56	15,24	5,94	18	0,67	0	0	4	398,82
	C	60-140	20	50,4	19,88	29,72	5,74	23	0,47	0	0	1	57,30

Tabla 4. Datos edafológicos. Fuente: Estudio sobre biometría y morfología del sistema radical de una repoblación de alcornoque (*Quercus suber* L.) en el T.M. de Calzada de Oropesa (Toledo)

Perfil	Horz	Prof (cm)	CIC mEq/100g	Na mEq/100g	K mEq/100g	Ca mEq/100g	Mg mEq/100g	S	C/N	N (%)	P (ppm)	K (ppm)
PP	Ap	0-30	3,2	0,05	0,14	2,88	0,77	3,84	14,33	0,03	2	7
	Bt	30-60	5,0	0,07	0,14	3,46	1,15	4,82	19,5	0,02	2	6
	C	60-140	14,4	0,14	0,23	10,18	4,22	14,77	27,0	0,01	0	5

Tabla 5. Datos edafológicos (nutrientes). Fuente: Estudio sobre biometría y morfología del sistema radical de una repoblación de alcornoque (*Quercus suber* L.) en el T.M. de Calzada de Oropesa (Toledo)

3.2 Climatología

3.2.1 Introducción

Todos los datos empleados se han recogido de la web del SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) de la estación meteorológica ubicada en Toledo, específicamente en Alcolea de Tajo, que es la más cercana a la zona de estudio. Estos datos están tomados entre los años 2003 y 2023, a una altitud de 365 metros y situado específicamente a una latitud de 39° 50' 7" N y una longitud de 4° 11' 0" W. (Mercado Vázquez, 2023)

3.2.2 Temperatura

Mes	Temp Media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Mín (°C)
Enero	6,09	17,47	-5,26
Febrero	7,81	19,84	-4,03
Marzo	10,87	23,93	-2,37
Abril	14,10	27,87	1,56
Mayo	18,71	33,81	5,00
Junio	24,13	39,36	10,45
Julio	27,46	40,58	12,74
Agosto	26,81	40,67	12,64
Septiembre	22,07	36,20	8,95
Octubre	16,52	30,27	4,00
Noviembre	10,28	21,93	-1,92
Diciembre	6,85	17,29	-4,56

Tabla 6. Temperaturas medias. Fuente: SIAR

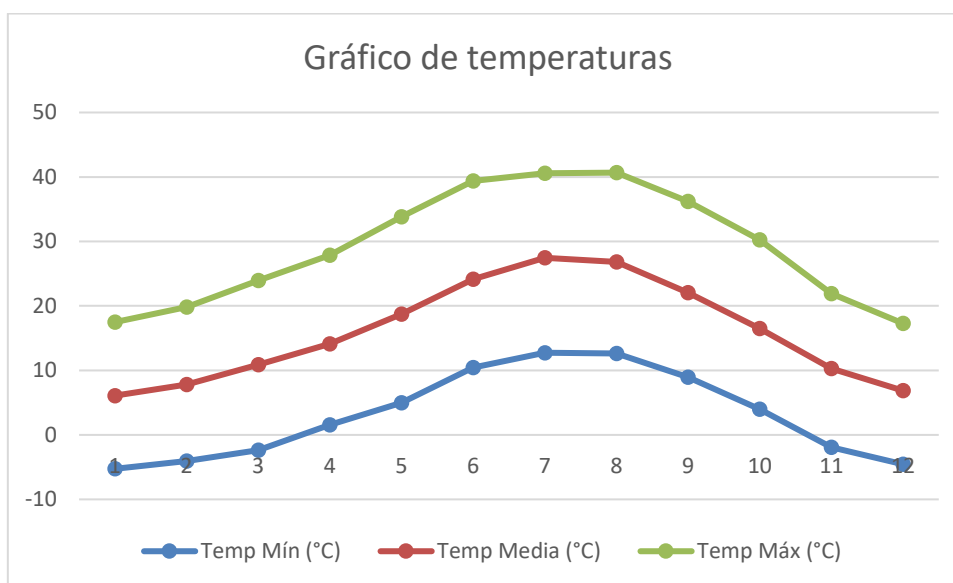


Figura 8. Evolución de temperaturas medias, máximas y mínima. Fuente: elaboración propia

Se puede concluir con estos resultados que Alcolea de Tajo es un municipio con clima mediterráneo continental. Se caracteriza por inviernos fríos por debajo de los 5 grados entre diciembre y enero, y por veranos cálidos y secos superando los 30 grados en julio y agosto.

3.2.3 Régimen de heladas

Año	Última helada primavera	Primera helada otoño	Nº de días
2003	17 de febrero	24 de diciembre	310
2004	3 de marzo	16 de noviembre	258
2005	11 de marzo	30 de noviembre	264
2006	2 de marzo	15 de diciembre	288
2007	24 de enero	14 de noviembre	294
2008	7 de marzo	18 de noviembre	256
2009	17 de febrero	15 de diciembre	301
2010	13 de marzo	28 de noviembre	260
2011	3 de marzo	18 de diciembre	290
2012	7 de marzo	1 de diciembre	269
2013	14 de marzo	21 de noviembre	252
2015	20 de febrero	24 de noviembre	277
2016	12 de marzo	25 de diciembre	288
2017	25 de enero	1 de diciembre	310
2019	8 de febrero	30 de diciembre	325
2020	14 de enero	3 de diciembre	324
2021	22 de marzo	3 de diciembre	256
2022	20 de febrero	3 de diciembre	286
2023	3 de marzo	17 de diciembre	289

Tabla 7. Período libre de heladas. Fuente: SIAR

Con estos datos recogidos del SIAR, se realizará el cálculo del período libre de heladas con la media de los 20 años, que da como resultado 294,5 días.

Por tanto:

- Estación media libre de heladas: 294,5 días \approx 9,67 meses
- Estación máxima libre de heladas: 339 días \approx 11,14 meses
- Estación mínima libre de heladas: 258 días \approx 8,47 meses

3.2.4 Precipitación y humedad relativa

Mes	Hum Media (%)	Precip. (mm)	P. Efect. (mm)
Enero	81,71	31,12	31,50
Febrero	73,77	25,13	37,83
Marzo	67,56	21,13	42,67
Abril	65,69	19,82	50,58
Mayo	55,11	14,36	33,15
Junio	43,64	10,83	14,24
Julio	34,42	8,73	5,57
Agosto	36,77	8,56	7,06
Septiembre	49,91	12,47	39,41
Octubre	66,67	16,87	79,48
Noviembre	79,54	32,97	56,13
Diciembre	84,58	36,21	44,12

Tabla 8. Precipitación y humedad relativa. Fuente: SIAR

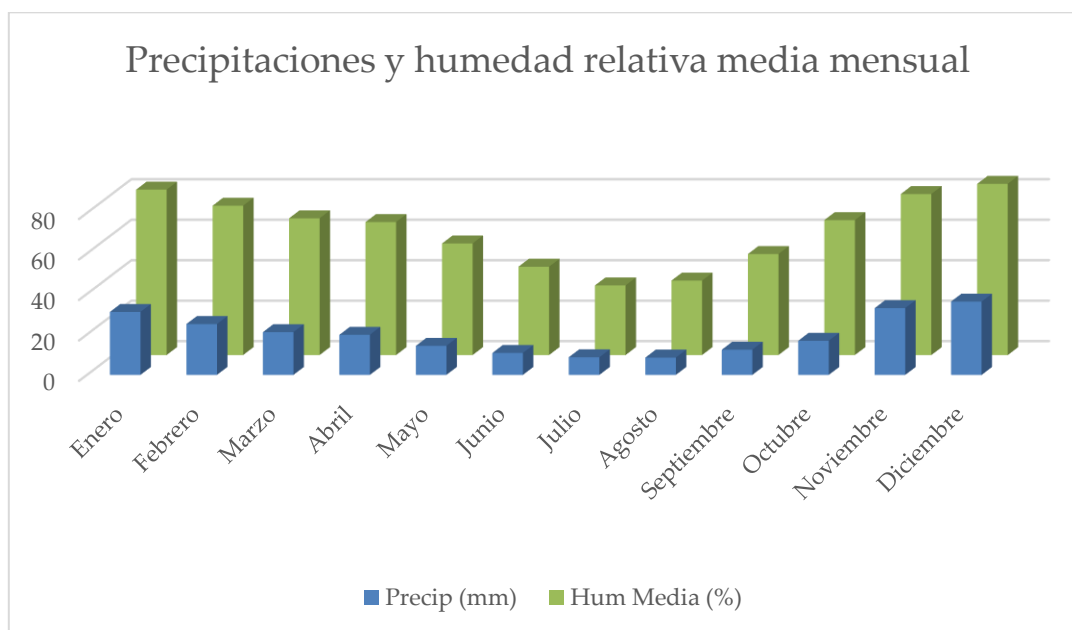


Figura 9. Precipitaciones y humedad relativa media mensual. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la figura 9, hay una gran variación a lo largo del año tanto de las precipitaciones como de la humedad relativa. En cuanto a las precipitaciones se puede apreciar que no son muy abundantes, son más bien escasas, teniendo sus valores máximos en los meses de invierno y primavera. En verano son prácticamente inexistentes.

A continuación, se muestra el diagrama ombrotérmico, que relaciona las precipitaciones y las temperaturas medias mensuales. El área comprendida entre las dos curvas nos indica la duración y la intensidad del periodo de sequía.

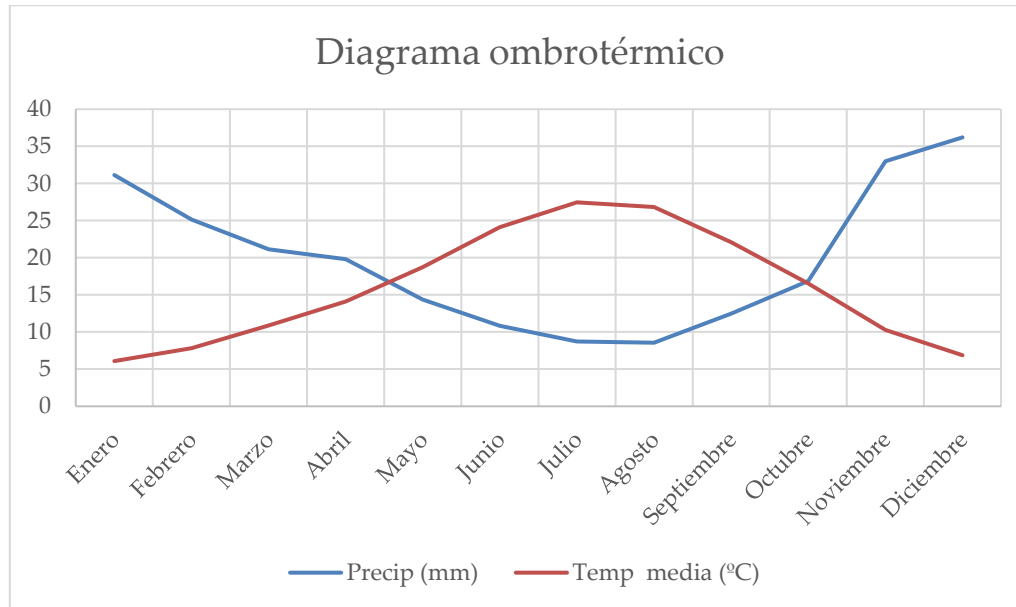


Figura 10. Diagrama ombrotérmico. Fuente: elaboración propia.

3.2.5 Clasificación climática

En general, las clasificaciones climáticas establecen categorías definidas por unas condiciones sobre parámetros climáticos para poder establecer clasificaciones climáticas.

La clasificación agroclimática se basa en Papadakis, que limita los climas en función de las zonas agrícolas. Tiene factores muy importantes para tener en cuenta como son la severidad de los inviernos y la duración y calor de los veranos. Se delimitan el tipo de invierno, el tipo de verano y el régimen hídrico.

- Tipo de invierno:

El tipo de invierno define la severidad de la estación fría en función de la temperatura media de mínimas absolutas del mes más frío ($t'a$), la temperatura media de mínimas del mes más frío ($t1$) y la temperatura media de máximas del mes más frío ($T1$), teniendo en cuenta la siguiente tabla:

Tipo de invierno	t'a (°C)	t1 (°C)	T1 (°C)
Ecuatorial (Ec)	> 7	> 18	
Tropical			
cálido (Tp)	> 7	13 a 18	> 21
medio (tP)	> 7	8 a 13	> 21
fresco (tp)	> 7		< 21
Citrus			
tropical (Ct)			
(Ci)	-2,5 a 7 -2,5 a 7	> 8	> 21 10 a 21
Avena			
cálida (Av)	-10 a -2,5	> -4	> 10
fresca (av)	> -10		5 a 10
Triticum			
avena-trigo (Tv)			
cálido (Ti)	-29 a -10		> 5
fresco (ti)	> -29		0 a 5
fresco (ti)	> -29		< 0
Primavera			
cálida (Pr)	< -29		> -17,8
fresca (pr)	< -29		< -17,8

Tabla 9. Tipos de invierno según Papadakis. Fuente: Monografía (Almorox Alonso, de Antonio García, & Saa Requejo, 2004)

Según los datos recogidos en la página web del SIAR, el mes más frío es enero.

- Temperatura mínima absoluta: -5,26 °C
- Temperatura media mínima: 1,04 °C
- Temperatura media máxima: 6,09 °C

Observando la tabla 9, podemos establecer el tipo de invierno, que es "Av" (Avena cálida fresca).

$$-10 < -5,26 > -2,5 \text{ (Av)}$$

$$1,04 > -4 \text{ (Av)}$$

$$5 < 6,09 > 10 \text{ (av)}$$

- Tipo de verano:

El tipo de verano define el calor veraniego. Para definirlo se deben considerar los siguientes datos:

- EMLH: estación media libre de heladas.
- La media de las temperaturas medias de máximas de los 6 meses más cálidos.
- La media de máximas del mes más cálido.
- La media de mínimas del mes más cálido.
- La media de la media de mínimas de los dos meses más cálidos.

Tipo de verano	ExLH (mes)	Media de las temperaturas medias de máximas de los n meses más cálidos	T_{12}	t_{12}
Gossypium cálido (G)	> 4,5 [m]	> 25 [6]	> 33,5	
fresco (g)	> 4,5 [m]	> 25 [6]	< 33,5	> 20
Coffe (c)	= 12 [m]	> 21 [6]	< 33,5	< 20
Oriza (O)	> 4 [m]	21 a 25 [6]		
Maize (M)	> 4,5 [D]	> 21 [6]		
Triticum cálido (T)	> 4,5 [D]	< 21 [6] y > 17 [4]		
fresco (t)	2,5 a 4,5 [D]	> 17 [4]		
Polar cálido (P) (taiga)	< 2,5 [D]	> 10 [4]		
fresco (p) (tundra)	< 2,5 [D]	> 6 [2]		
Frigid cálido (F)		< 6 [2]	> 0	
fresco (f)			< 0	
Andino-Alpino cálido (A)	< 2,5 [D]	> 10 [4]		
fresco (a)	> 1 [M] < 1 [M]	< 10 [4]		

Tabla 10. Tipos de invierno según Papadakis. Fuente: Monografía (Almorox Alonso et al., 2004).



La media de máximas de los 6 meses más cálidos, de abril a septiembre, son 20,80; 26,26; 31,96; 35,68; 29,71; 23,37. La media de estos 6 valores es 27,96. El mes más cálido es julio con 35,68 °C. En consecuencia, cumple las condiciones de *Gossypium* cálido (G), porque: $4,5 < 9,67$ (EmLH); $25 < 27,96$ y $33,5 < 35,68$.

Tipo de invierno	Av
Tipo de verano	G
Régimen térmico	Continental cálido

Figura 11. Clasificación del tipo de invierno según Papadakis. Fuente: Monografía "Metodología para la elaboración de estudios aplicados de climatología".

4 OBJETIVOS

Los objetivos del presente proyecto son:

- Estimación de la biomasa aérea en alcornocal mediante técnicas geoespaciales en Calzada de Oropesa (Toledo) a partir del diámetro obtenido de los dendrómetros de banda y la altura con la nube de puntos extraída con el sensor LiDAR.
- Realización de un inventario detallado de los alcornocales de la zona de estudio mediante la recopilación de datos dendrométricos y geoespaciales, con el fin de generar una base de información precisa.
- Obtención y elaboración de un catálogo de imágenes y geodatos a partir de las imágenes RGB, Multiespectrales y datos LiDAR mediante técnicas UAV (vehículo aéreo no tripulado).
- Estudiar la correlación existente entre los parámetros obtenidos y las ecuaciones para comprobar la veracidad de los resultados. Así como un análisis de correlación entre índices de vegetación extraídos a partir de las imágenes multiespectrales y la vigorosidad del arbolado.

5 MATERIALES Y RECURSOS

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado una combinación de tecnologías de teledetección, sensores remotos y herramientas de análisis geoespacial.

Se han empleado medidores no invasivos como una antena GNSS, dendrómetros de banda, potenciómetros, el dispositivo Coveless CQ05 y un medidor láser Pentax M100, esenciales para la recopilación de datos de campo con alta precisión.

Destaca el uso de un UAV DJI Matrice 300 RTK, equipado con una cámara RGB, un sensor LiDAR y un sensor multiespectral Altum PT, que han permitido la obtención de datos de alta resolución para el análisis de la biomasa en el alcornocal.

Finalmente, se han utilizado diversos recursos para la adquisición, procesamiento y análisis de la información geoespacial, lo que ha sido clave para el desarrollo de este estudio.

5.1 Equipo GNSS RTK

Para la obtención de datos georreferenciados se ha usado la antena inteligente compacta de Leica Zeno FLX100 plus que proporciona posicionamiento GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) de precisión centimétrica junto con servicios de corrección RTK.



Figura 12. Antena GNSS inteligente compacta "Leica Zeno FLX100 plus". Fuente: elaboración propia

5.2 Dendrómetros de banda

Para la medición de los diámetros de los alcornoques se han colocado 80 dendrómetros de banda de una o dos bridas de acero inoxidable de 60 cm de longitud, en función del diámetro del árbol, y un muelle metálico de 7 cm de longitud. Además, las mediciones se realizaron con un pie de rey electrónico con una precisión de 0,01 mm.



Figura 13. Detalle de los dendrómetros de banda instalados. A la izquierda se muestra el muelle y a la derecha la zona de medida. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales).

5.3 Dendrómetro potenciómetro

En cuatro alcornoques con dendrómetros de banda (dos en cada parcela) se instalaron dendrómetros potenciométricos similares a los desarrollados por la Universidad de Huelva (Vázquez-piqué et al., 2009). Estos dendrómetros registran variaciones diarias de crecimiento según el estado hídrico, el crecimiento radial acumulado y el periodo vegetativo del árbol. Colocados cerca del dendrómetro de banda y en contacto con el tronco, usan un sensor de posición lineal que convierte el desplazamiento en voltios, registrados por un dispositivo (ONSET HOBO UX120-006M) en una caja estanca. La relación de 1 mV a 4 micras, con una precisión de 16 bits, da una resolución de 3,24 micras (M. Sánchez González, 2018).



Figura 14. HOBO UX120-006M con sensor de posición. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales).

5.4 Dispositivo Coveless CQ05

Para la medición del calibre del corcho, se utilizó el dispositivo electrónico Coveless CQ05, que detecta la variación de conductividad entre el corcho (tejido de células muertas) y la capa madre. El electrodo de referencia (ER) y el electrodo de medición (EM) forman parte del sistema de medición, permitiendo identificar la transición entre el corcho y la capa madre mediante cambios en la conductividad eléctrica (M. Sánchez González, 2018).

5.5 DJI Matrice 300 RTK (UAV)

El DJI Matrice 300 RTK es un cuadricóptero de 6,3 kg del fabricante DJI Technology, con un tiempo máximo de vuelo de 55 minutos. Equipado con el sistema anticolidión Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B), el UAV puede alcanzar una precisión de posicionamiento de 1,0-1,5 cm + 1 ppm utilizando RTK-GNSS.

Distancia máxima de transmisión de 15 km	Tiempo máximo de vuelo de 55 minutos	Detección y posicionamiento en seis direcciones	Pantalla principal de vuelo
Protección IP45	Temperatura de funcionamiento entre -20 a 50 °C	Baterías intercambiables en caliente	Sistema de gestión de estado del VANT

Figura 15. Características de DJI Matrice 300 RTK. Fuente: (Ibericadron)



Figura 16. MATRICE 300 RTK. Fuente: elaboración propia

En este UAV se han embarcado sensores del tipo multiespectral, LIDAR, RGB y Térmico.

5.6 Cámara RGB (UAV)

La cámara DJI Zenmuse P1 es una cámara que ofrece DJI para el Matrice 300 RTK. Se trata de una cámara digital de 45 megapíxeles (tamaño de píxel 4,4 μm) equipada con un sensor CMOS de fotograma completo (35,9 mm \times 24 mm) que puede funcionar con varias lentes cámara (Enterprise).



Figura 17. Sensor Zenmuse P1. Fuente: elaboración propia

5.7 Sensor LiDAR

Sensor de escaneo láser aéreo DJI Zenmuse L1. Este escáner, que está equipado con un módulo LiDAR del fabricante Livox, tiene un alcance de 450 m con un campo de visión de 70°.

Además, está equipado con una cámara RGB de 1 pulgada destinada a la cartografía, complementada con un estabilizador de 3 ejes que controla la inclinación, la rotación y el paneo.



Figura 18. Sensor DJI Zenmuse L1. Fuente: elaboración propia

5.8 Sensor multiespectral Altum PT.

Ofrece imágenes multiespectrales de alta resolución con sensor Mica Sense Altum que cuenta con 6 bandas como Azul (centro de 475 nm, ancho de banda de 32 nm), Verde (centro de 560 nm, ancho de banda de 27 nm), Rojo (centro de 668 nm, ancho de banda de 14 nm), Borde Rojo (717 nm centro, ancho de banda de 12 nm), infrarrojo cercano (centro de 840 nm, ancho de banda de 57 nm) e infrarrojo térmico de onda larga FLIR (8–14 μm). (Alfonso Carbajosa, 2023)



Figura 19. Cámara MicaSense RedEdge-MX: Multiespectral. Fuente. elaboración propia

5.9 Medidor Laser PENTAX M-100

Este telémetro laser utiliza el principio de la telemetría óptica, y se ha empleado para calcular la altura de tronco de cada uno de los alcornoques del inventario. El procedimiento ha sido la colocación del medidor en el comienzo de la primera rama, apuntando al suelo y la distancia se calcula automáticamente a través del tiempo que tarda en reflejarse el punto laser de vuelta al dispositivo. Su precisión es de 0,2 mm, por lo que es un dispositivo con elevada precisión.



Figura 20. Medidor Laser. Fuente: <https://mendilurposition.com/producto/medidor-laser-disto-d2-leica/>



5.10 Tratamiento informático de los datos

Para la recopilación de datos del inventario, se han implementado dos aplicaciones móviles. Leica Zeno Connect es un software desarrollado por Leica Geosystems que facilita la comunicación entre el receptor GNSS y la aplicación, permitiendo además la configuración en tiempo real de las fuentes de corrección diferencial. Por otro lado, SW Maps (GIS and Data Collector) es una aplicación que permite la digitalización de mapas y el análisis de datos geográficos, logrando obtener las coordenadas precisas de cada alcornoque gracias a la antena GNSS, y posibilitando su exportación en un archivo con formato KML para su posterior visualización en un sistema de información geográfica.

ArcGIS Pro es una aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollada por ESRI, que permite la visualización, análisis y gestión de datos geoespaciales.

Con este programa se han realizado los diferentes mapas y gráficos para estimar la biomasa de los alcornocales, incluyendo la importación y preparación de datos, la creación de modelos digitales, el cálculo de la altura máxima de cada árbol, la delimitación de las copas, el cálculo de estadísticas, la unión de datos, el modelado y cálculo de la biomasa mediante diferentes ecuaciones, y la generación de mapas y gráficos de biomasa y análisis espaciales. Todo ello ha sido recogido en gráficos visuales.

PIX4D (<https://www.pix4d.com/es/>) es un software especializado en el procesamiento de datos de fotogrametría obtenidos mediante UAV. Su tecnología avanzada permite generar productos de alta precisión, como nubes de puntos, modelos digitales de superficie y ortomosaicos.



6 METODOLOGÍA

En este apartado se describe el conjunto de procedimientos llevados a cabo para realizar este trabajo. La siguiente figura representa un esquema de las principales etapas que se han llevado a cabo.

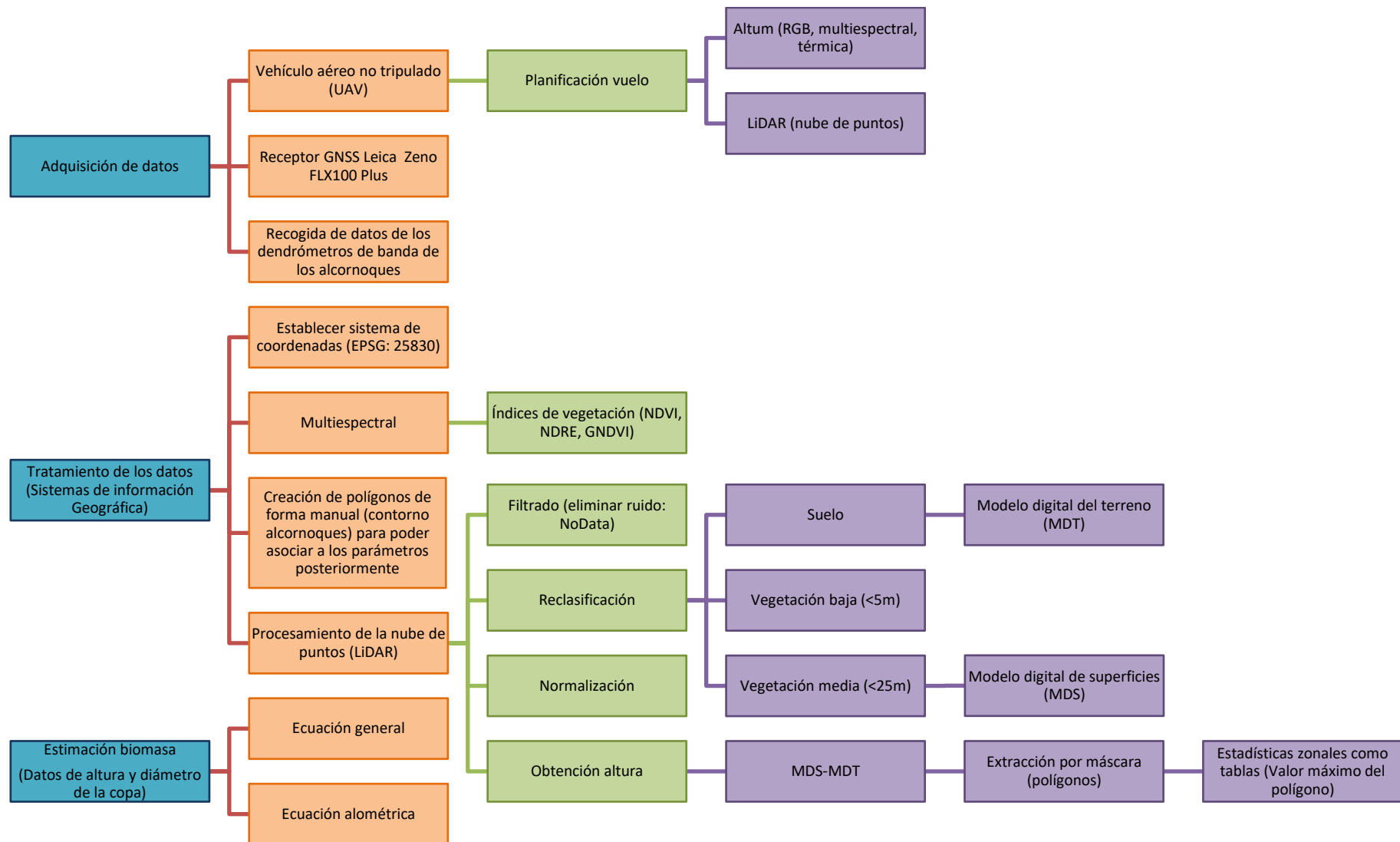


Figura 21. Esquema de la metodología empleada

6.1 Metodología LiDAR (Light Detection And Ranging)

La tecnología LiDAR permite medir distancias mediante la emisión de pulsos láser que se reflejan en el terreno y otros objetos. Al calcular el tiempo que tarda cada pulso en ir y volver, se determina la distancia entre el sensor y el objetivo. Los fotones reflejados se transforman en impulsos eléctricos e interpretados por un registrador de datos de alta velocidad. Dado que la fórmula para la velocidad de la luz es conocida, los intervalos de tiempo entre la emisión y la recepción pueden calcularse fácilmente. Estos intervalos se transforman en distancia con la ayuda de la información posicional obtenida de los receptores GNSS del UAV, que registra constantemente la altitud. Una ventaja de esta tecnología frente a otras es que los datos pueden adquirirse en condiciones atmosféricas en las que la fotografía aérea convencional no puede.

El escaneo se realiza combinando dos movimientos: uno longitudinal (trayectoria del UAV) y otro transversal (mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner). Para determinar las coordenadas de la nube de puntos, se requiere la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento. El sistema se apoya en un GNSS diferencial y un sistema de navegación inercial. El resultado son miles de puntos por segundo.

Los productos fotogramétricos estándar derivados de los datos LiDAR incluyen modelos de contorno y elevación para ortofotos. Para obtener contornos precisos, es necesario un postprocesamiento de los datos iniciales. Los procedimientos de validación deben incorporarse en el proceso para asegurar que los contornos finales sean representativos del terreno (filtrado).

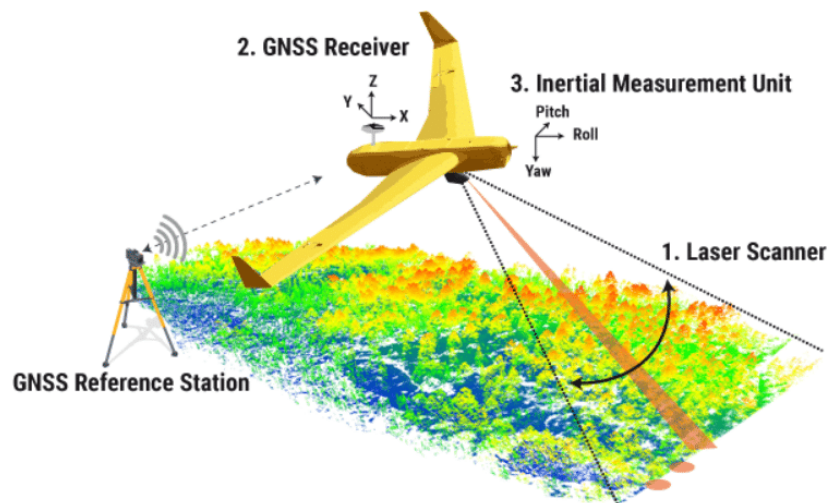


Figura 22. Componentes de un sistema LiDAR. Fuente: <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sistema-lidar/>

En la figura 22 podemos diferenciar los distintos componentes de los que consta un sistema LiDAR. Un escáner láser que es el responsable de emitir los pulsos, obteniendo así la nube de puntos que depende a su vez de la velocidad a la que vaya el UAV; un Laser rangefinder (LRF), que es un sensor óptico de distancia de escaneo bidimensional que se encarga de medir las distancias a los objetos mediante los retornos de los pulsos láser; un sistema GNSS que determina la posición y la orientación del sensor para poder generar la nube de puntos con gran precisión; y por último, la tecnología de control y procesamiento.

6.2 Planificación de vuelo

Previamente al vuelo es necesario realizar un plan de vuelo o FPL para poder obtener de forma segura los datos mediante escáner laser aéreo.

La planificación de vuelo se realiza sobre la zona de estudio, en este caso al tener dos parcelas se ha realizado un plan de vuelo distinto para cada una de ellas, siendo de interés el plan realizado en la parcela resaltada en la figura 23.

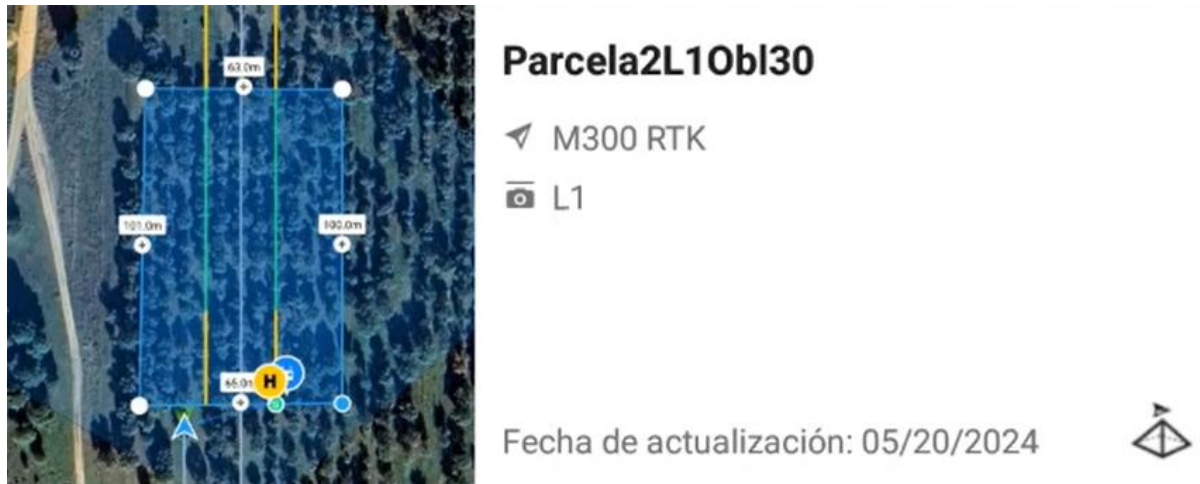


Figura 23. Ejemplo de plan de vuelo para LiDAR en la parcela de estudio. Fuente: elaboración propia

Un aspecto fundamental es el GSD (Ground Sample Distance), que representa la distancia entre los centros de dos píxeles consecutivos medidos en el terreno. Cuanto menor sea el valor del GSD, mayor será la resolución de nuestro modelo.

El GSD depende de la altura de vuelo (a menor altura, mayor resolución) y el sensor y la óptica de la cámara (cuantos más megapíxeles, mayor resolución).

$$GSD = \frac{\text{Sensor del pixel} \times \text{altura de vuelo}}{\text{Focal de la cámara}}$$

Por esta razón es tan necesario considerar el tipo de cámara que se utilice, la altura seleccionada, y el solape, tanto transversal como longitudinal. Este solape permite determinar el número de pasadas necesarias para cubrir la mayor área posible, teniendo en cuenta el tiempo de vuelo, la cantidad de imágenes requeridas, el tamaño del píxel y la velocidad de la cámara (Aguilar Ruiz, 2021).

6.3 Procesamiento del vuelo

Para el procesamiento del vuelo, se utiliza PIX4D que es un paquete de software que utiliza imágenes capturadas por los UAV para generar modelos y mapas 3D destinados a diferentes trabajos de ingeniería como topografía. Tras importar las imágenes capturadas por el UAV se genera la nube de puntos en 3D y un ortomosaico.

6.4 Adquisición de datos

6.4.1 Adquisición de datos en campo

Para poder obtener la altura y diámetro, debemos asociar previamente esos parámetros a cada uno de los alcornoques presentes en la zona de estudio. Para ello se ha realizado un inventario de 160 individuos donde se están recogiendo (Anejo 2, plano 2) datos de medida del diámetro normal sobre el corcho, la altura total y el calibre del corcho a la altura del pecho (DBH) de 1,3 metros de altura. El diámetro del tronco a la altura del pecho (DBH) es una de las medidas más comunes de la estructura de los árboles debido a su facilidad de medición y a sus fuertes relaciones con otras características estructurales y no estructurales de los bosques urbanos. (Morgenroth, Nowak, & Koeser, 2020).



Figura 24. Detalle de la numeración de cada uno de los alcornoques. Fuente: elaboración propia

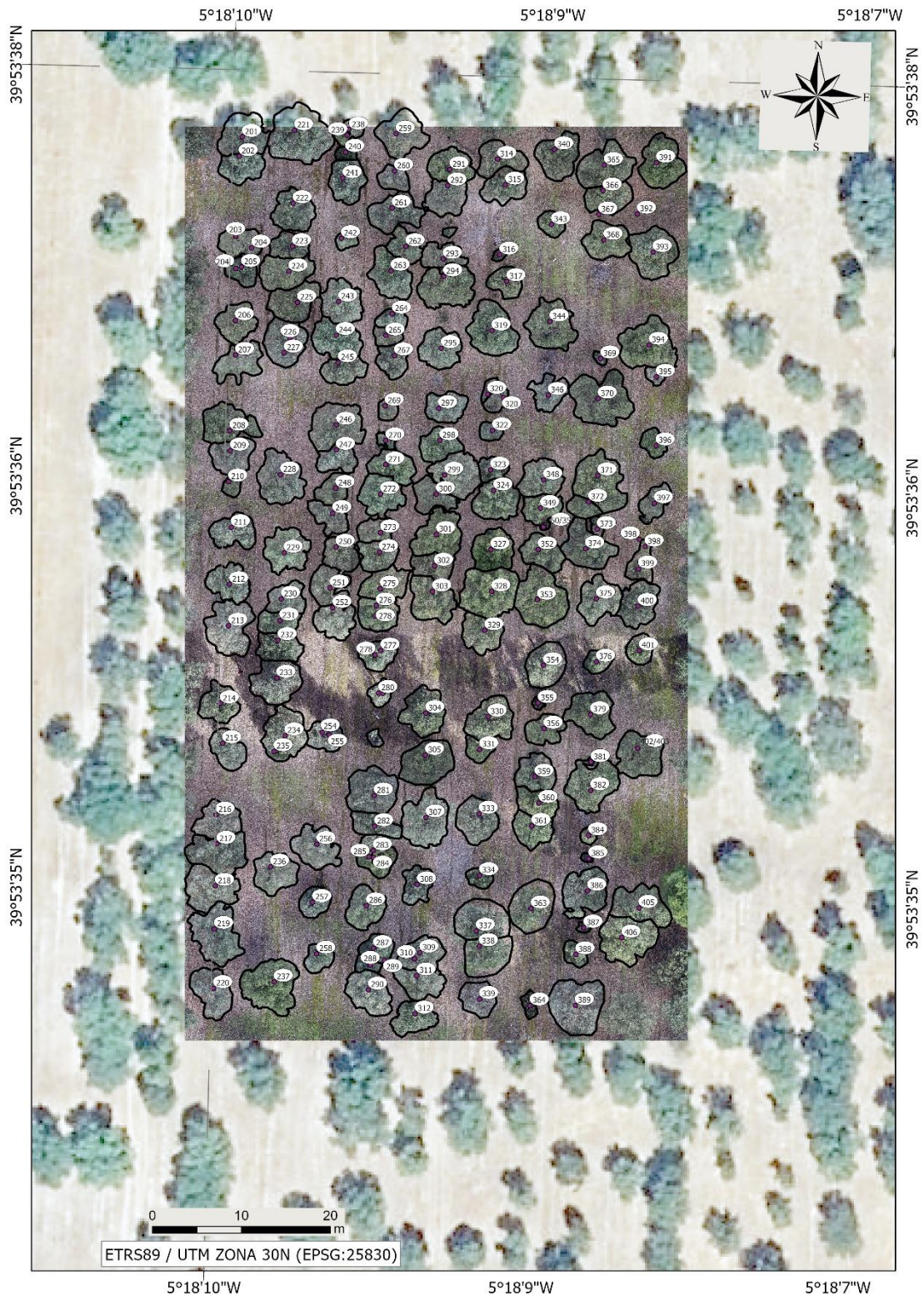


Figura 25. Inventario geolocalizado de todos los alcornoques *Quercus Suber L.* Fuente: elaboración propia



Figura 26. Recogida de datos para el inventario 20 de mayo de 2024 con la antena GNSS "Leica Zeno FLX100 plus"

6.4.2 Adquisición de datos de los diámetros (dendrómetros de banda)

Para obtener la altura y el diámetro de cada alcornoque presente en la zona de estudio, fue necesario asociar previamente estos parámetros a los árboles inventariados. Con este propósito, se ha realizado un inventario forestal donde se han recopilado datos como el diámetro normal sobre el corcho, la altura total y el calibre del corcho a 1,3 metros de altura (DBH).

Hasta marzo de 2021, los diámetros de los alcornoques se obtenían manualmente. Sin embargo, a partir de esa fecha, se decidió implementar un seguimiento periódico del crecimiento diametral sobre el corcho mediante la instalación de dendrómetros de banda, lo que supuso una mejora significativa en la gestión. Estos dispositivos se colocaron en 80 de los 160 alcornoques, por lo que los cálculos y los resultados posteriores se basan en estos ejemplares monitorizados.

Previamente a la instalación de los dendrómetros, la superficie de bornizo fue limada para eliminar las irregularidades propias del corcho virgen. A continuación, se posicionó el dendrómetro colocando la zona de medida en el norte. El crecimiento diametral se determinó mediante el desplazamiento de cada dendrómetro respecto a la posición inicial. Las mediciones se realizaron cada 20 días utilizando un pie de rey electrónico. La Tabla 11 muestra las principales variables que caracterizan los árboles seleccionados.

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
Diámetro sobre corcho (cm)	21,299	9,800	32,550	5,084
Altura de copa (m)	2,108	1,400	6,200	0,543
Altura total (m)	6,551	3,300	9,700	1,243
Calibre del corcho (mm)	12,638	4,500	29,000	4,650
Crecimiento acumulado de diámetro sobre corcho (mm)	1,167	-0,175	5,096	0,953

Tabla 11. Principales variables que caracterizan los alcornoques. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2022).

Para tratar de monitorizar el crecimiento del corcho, en cada alcornoque con dendrómetro de banda se seleccionó una zona plana y uniforme cercana a la posición del dendrómetro, similar al tamaño de una cala (10 x 10 cm). Además, se señaló el centro de esta con un clavo para facilitar su localización en las sucesivas mediciones.

En la zona seleccionada, se midió el calibre del corcho cada 20 días con el dispositivo Coveless CQ05. Para realizar la medición, se colocó el electrodo de referencia (ER) en contacto con la capa madre a través de una “raja” en el corcho (Figura 27). Posteriormente, el electrodo de medición (EM) se introdujo en el corcho hasta detectar el cambio en conductividad, momento en el cual el dispositivo emitió un sonido para confirmar la lectura.

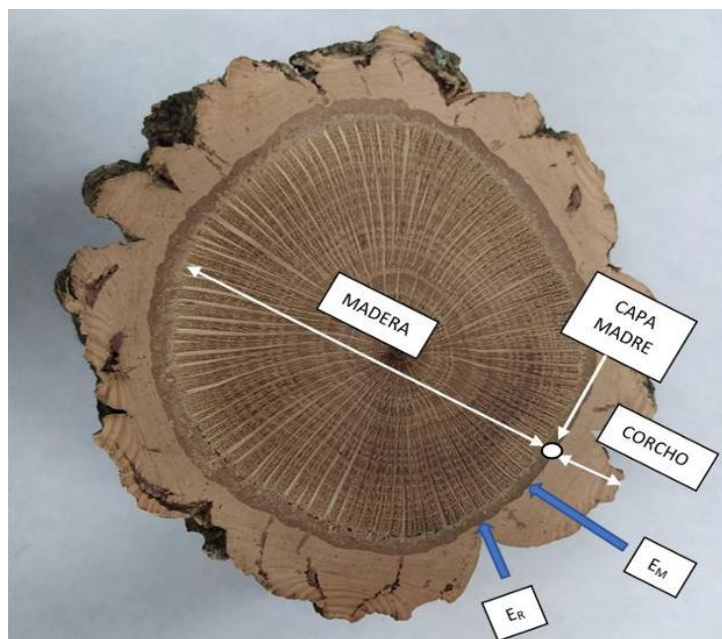


Figura 27. Rodaja de alcornoque en el que se muestra la colocación de los electrodos que componen la máquina Coveless. Fuente: Monitorización del crecimiento diametral del alcornoque diferenciando el crecimiento de la madera y del corcho (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2022).



6.4.3 Adquisición de datos del vehículo aéreo no tripulado (UAV)

La adquisición de datos documentada se llevó a cabo el 20 de mayo de 2024, fecha que constituye la base principal para el análisis de este trabajo. Sin embargo, se realizaron vuelos adicionales en diferentes fechas, como en noviembre de 2023, con el objetivo de capturar información en distintos estados fenológicos del alcornoque. Estos datos complementarios forman parte del marco del proyecto ACICORK, cuyo objetivo es desarrollar herramientas para la toma de decisiones en la gestión sostenible de la cadena de valor del corcho. ACICORK busca mejorar la producción de corcho de calidad, la capacidad de mitigación del cambio climático y la resiliencia de los alcornocales mediante un enfoque interdisciplinario que integra técnicas geoespaciales para el seguimiento forestal y la mejora de las reservas de carbono ("Alcornocales climáticamente inteligentes (ACICORK).").

Para la obtención de datos se ha empleado el UAV Matrice 300 RTK, equipado con dos sensores distintos, lo que ha permitido realizar dos vuelos independientes.

En el primer vuelo se ha empleado un sensor Altum-PT para la obtención de datos multiespectrales y térmicos. Este sensor permitió capturar imágenes en varias bandas espectrales (RGB, NIR, Red Edge y térmica), que se han utilizado para analizar el estado fisiológico de los alcornocales a través de índices de vegetación, como NDVI y NDRE.

En el segundo vuelo se ha utilizado un sensor LiDAR, que permitió generar una nube de puntos de alta resolución. A partir de esta nube, se han creado un modelo digital del terreno (MDT) y un modelo digital de superficie (MDS), lo que facilita la estimación de la altura del dosel y, a partir de ello, la biomasa de los alcornocales.

El vuelo LiDAR se realiza a una altitud de 20 metros, lo que permite obtener datos de la nube de puntos con una densidad muy alta, de 936 puntos/m². La misión comienza con un vuelo vertical, recopilando datos directamente desde el terreno. Posteriormente, tras reposicionar el UAV, se realizan cuatro vuelos oblicuos, uno en cada dirección principal, con una inclinación de 45 grados. Este patrón de vuelo permite asegurar una cobertura completa y precisa del área de estudio.

	GSD (cm/píxel)	Altura de vuelo (m)	Solape longitudinal (%)	Solape transversal (%)
Altum- PT	2,62	60	80	75
LiDAR	0,82	20	70	50

Tabla 12. Resumen de parámetros de los vuelos

En la figura 28 se muestra cómo el sensor LiDAR permite una previsualización en tiempo real, lo que facilita verificar si los datos se están capturando correctamente y, en caso de detectar algún error, realizar las correcciones necesarias.

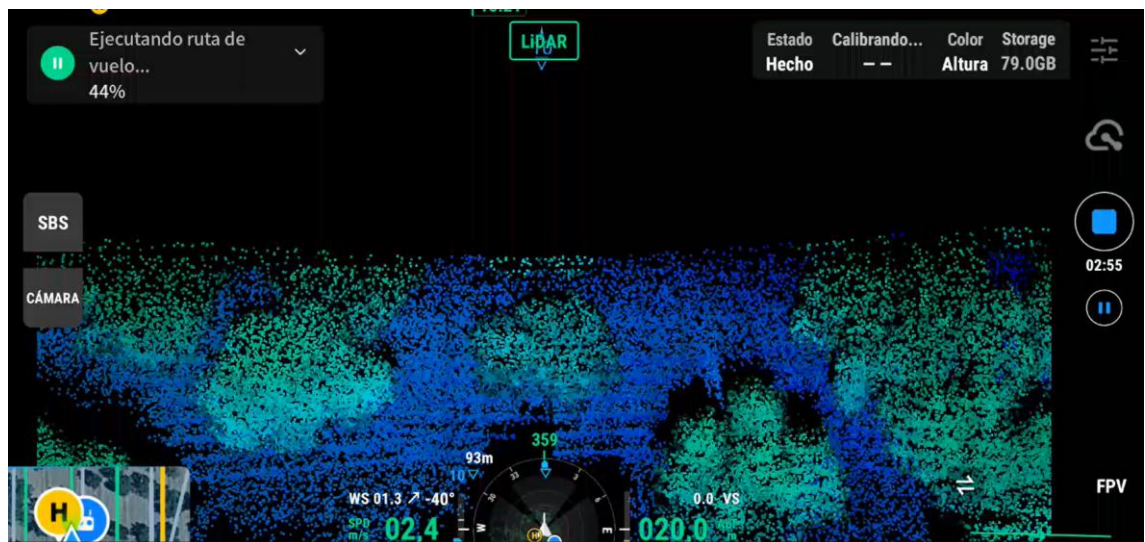


Figura 28. Nube de puntos en tiempo real (mostrando la reflectividad)

6.5 Tratamiento de los datos

Una vez procesados los datos obtenidos de los distintos vuelos realizados, se lleva a cabo el tratamiento de la información utilizando el software ArcGIS Pro. Durante este proceso, se define el sistema de coordenadas de referencia empleado, que corresponde al ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG 25830).

6.5.1 Delineación de copas de los árboles

El primer paso consiste en asociar los datos obtenidos del vuelo LiDAR (altura) y de los dendrómetros de banda (diámetro) con el inventario georreferenciado correspondiente a cada árbol. Para ello, se ha creado una capa de polígonos en el que se puede ver representado en la figura 29 el contorno de las 160 copas de los alcornoques ubicados en la finca de estudio. Esta capa fue digitalizada manualmente sobre la ortofotografía generada por el UAV, permitiendo identificar y delimitar cada copa individualmente.

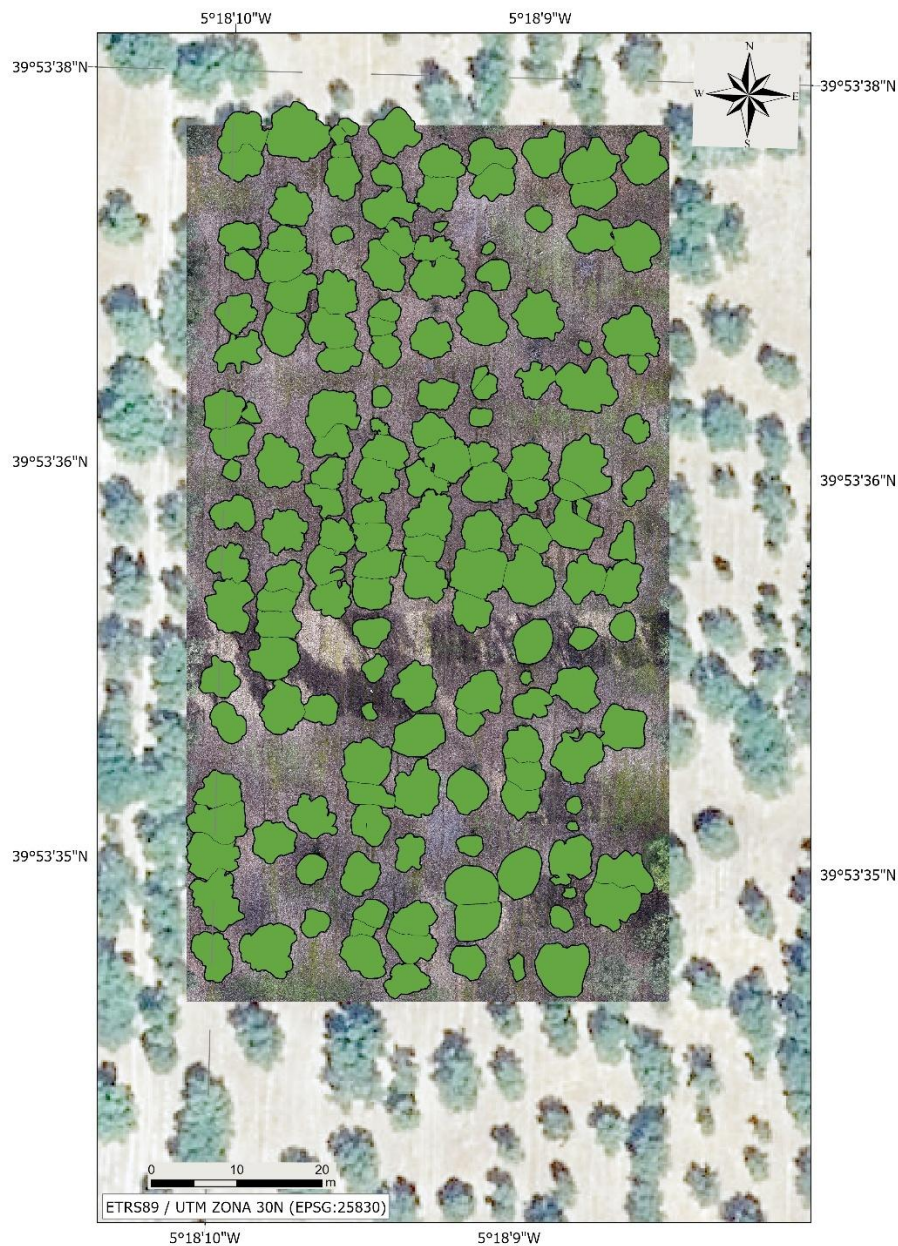


Figura 29. Creación de capa polígonos con la delimitación de cada alcornoque conforme al inventario georreferenciado

6.6 Preprocesamiento y procesamiento de datos de la nube de puntos

El procesamiento de los vuelos se lleva a cabo con el software Pix4d, en el cual se cargan las imágenes de cada vuelo en el sistema de coordenadas WGS84.

Una vez definidos los polígonos correspondientes a cada especie, según el inventario y los contornos digitalizados en la ortografía, se procede al cálculo de la altura y la superficie de cada alcornoque mediante el procesamiento de los datos obtenidos del sensor LiDAR (nube de puntos). Para ello, se siguen los pasos detallados a continuación:

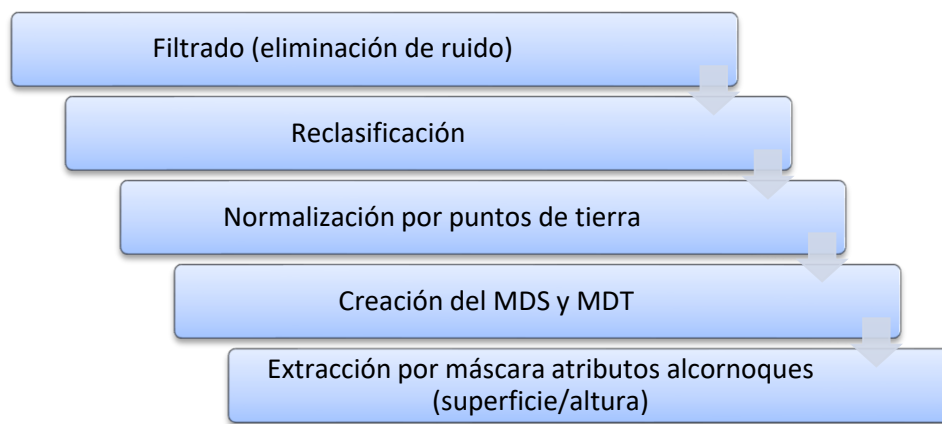


Figura 30. Pasos de procesamiento de la nube de puntos 3D ALS-UAV

6.6.1 Filtrado

En este paso se lleva a cabo la eliminación de posibles puntos erróneos en la nube de puntos. Para ello, se revisan las propiedades de la nube y se analiza la clasificación asignada por defecto. Como se muestra en la figura 31, la clasificación está dividida en puntos sin asignar y puntos correspondientes al suelo. El objetivo principal es inspeccionar los puntos sin asignar para determinar si forman parte de la nube de interés o si corresponden a datos erróneos.

En este caso, la clasificación por defecto ha segregado correctamente los datos de suelo y de vegetación, asociando estos últimos a puntos dispersos. Por esta razón, no se elimina ninguna de las clases incluidas en la clasificación.

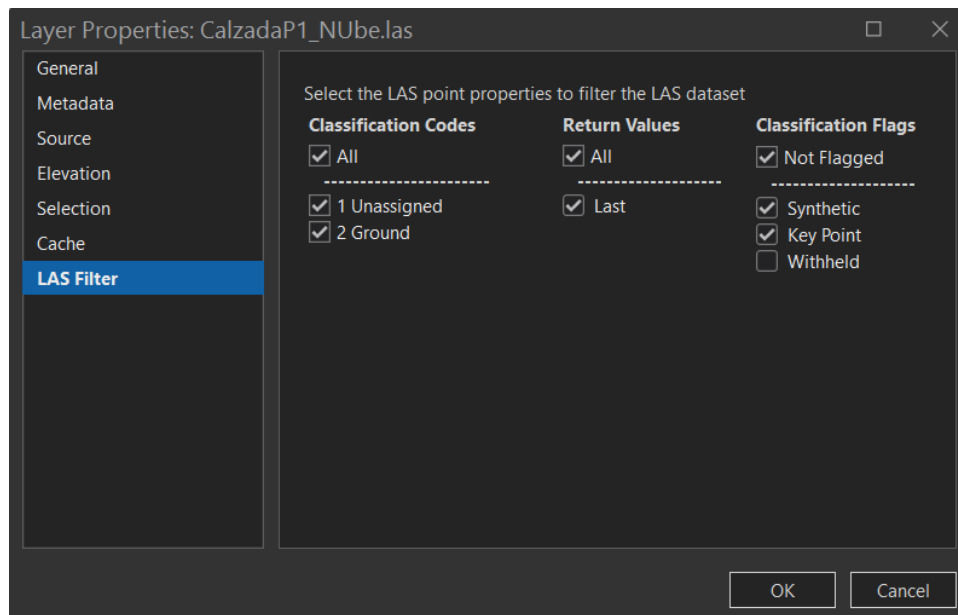


Figura 31. Clasificación por defecto de la nube de puntos obtenida por el sensor LiDAR

6.6.2 Reclasificación

Como se explicó en el subapartado anterior, el sistema por defecto clasifica los puntos en dos categorías principales, lo que resulta insuficiente para los objetivos del análisis. Por este motivo, es necesario realizar una reclasificación que permita diferenciar la vegetación en función de su altura, ya que la vegetación baja no es relevante en este estudio, enfocado exclusivamente en los alcornoques.

Se lleva a cabo una reclasificación en tres categorías:

- **Terreno (Ground):** Puntos correspondientes al suelo.
- **Vegetación baja (Low Vegetation):** Vegetación inferior a 3 metros de altura, que no se considera en el análisis.
- **Vegetación alta (Medium Vegetation):** Vegetación con una altura entre 3 y 25 metros, que corresponde a los alcornoques.

Estas distinciones son esenciales para la generación de dos modelos:

- **Modelo Digital del Terreno (MDT):** Utiliza los puntos clasificados como "terreno".
- **Modelo Digital de Superficies (MDS):** Emplea los puntos clasificados como "vegetación alta", representando las copas de los alcornoques.



Figura 32. Esquema de la clasificación que se va a realizar para poder obtener el modelo digital del terreno y el de superficies

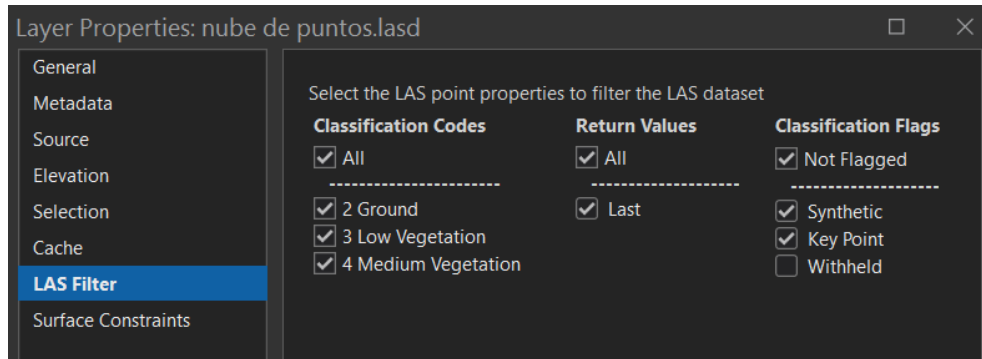


Figura 33. Reclasificación de la nube de puntos



Figura 34. Visualización en ArcGIS Pro de los puntos del terreno (suelo) tras la reclasificación



Figura 35. Visualización en ArcGIS Pro de los puntos que corresponden a los alcornoques (vegetación alta) tras la reclasificación



Figura 36. Visualización en ArcGIS Pro de los puntos del terreno y los que pertenecen a los alcornoques con los valores de altura

6.6.3 Normalización

Una vez completada la clasificación y obtenidas las clases necesarias, se realiza un proceso de normalización cuyo objetivo es determinar la altura de los alcornoques. Este proceso se basa en la generación de un **Modelo Digital del Terreno (MDT)** utilizando los puntos clasificados como "terreno" (suelo) y un **Modelo Digital de Superficies (MDS)** generado con los puntos pertenecientes a los alcornoques (vegetación alta).

Generación del Modelo Digital del Terreno (MDT):

Se emplea la herramienta **"Conjunto de datos LAS a ráster"** para crear el MDT utilizando únicamente los puntos de la nube de puntos clasificados como "terreno". Los valores de altura en este modelo varían entre 405 metros (mínima) y 414 metros (máxima).

Generación del Modelo Digital de Superficies (MDS):

Siguiendo el mismo procedimiento, se genera el MDS utilizando los puntos correspondientes a los alcornoques (vegetación alta). En este modelo, los valores de altura oscilan entre 410,413 metros (mínima) y 421,128 metros (máxima).

Estos modelos son fundamentales para calcular la altura relativa de los alcornoques al comparar el MDS con el MDT, obteniendo así la altura de la copa que será utilizada en el análisis posterior.

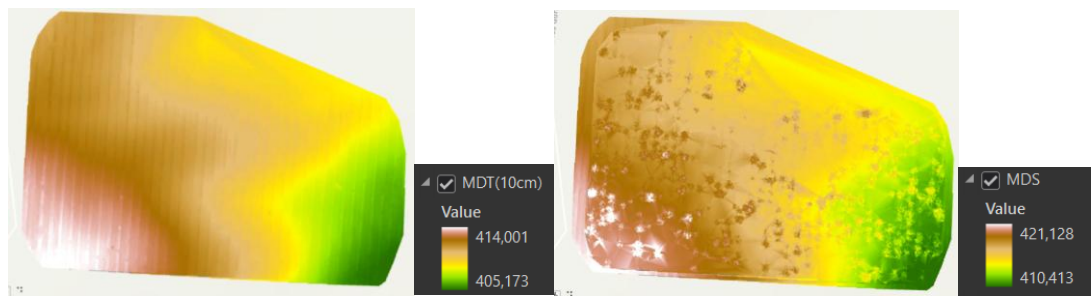


Figura 37. Visualización en ArcGIS Pro a la izquierda del Modelo Digital del Terreno y la derecha del Modelo Digital de Superficies

Una vez generados estos modelos, se realiza una normalización restando el Modelo Digital del Terreno (MDT) al Modelo Digital de Superficies (MDS) para obtener la altura real de los alcornoques con respecto al suelo.

Este cálculo se lleva a cabo utilizando la herramienta “Calculadora ráster”, que permite restar el MDS del MDT, generando así un Modelo de Altura del Dosel (CHM). Este modelo representa la altura de las copas de los árboles, proporcionando la información necesaria para el análisis posterior.

6.6.4 Asociación de los datos

Una vez obtenidas las alturas relativas al suelo, es necesario delimitar estas alturas a la capa de polígonos creada previamente, con el fin de asignar una altura máxima a cada uno de los árboles presentes en el área de estudio. En el Anejo 2, plano 3 se puede ver más en detalle las máscaras creadas.

Para asociar el Modelo de Altura del Dosel (CHM) con los contornos de los alcornoques, se utiliza la herramienta “Extraer por máscara”, que permite recortar el CHM en función de la capa de polígonos de las copas.



Figura 38. Creación máscaras ArcGIS Pro

Posteriormente, para calcular la altura máxima de cada árbol, se emplea la herramienta “Estadísticas zonales en forma de tabla”, la cual genera estadísticas zonales (como máximo, mínimo, media, y suma) para cada polígono. Esta herramienta permite obtener la altura máxima correspondiente a cada árbol, proporcionando valores fundamentales para los análisis posteriores.

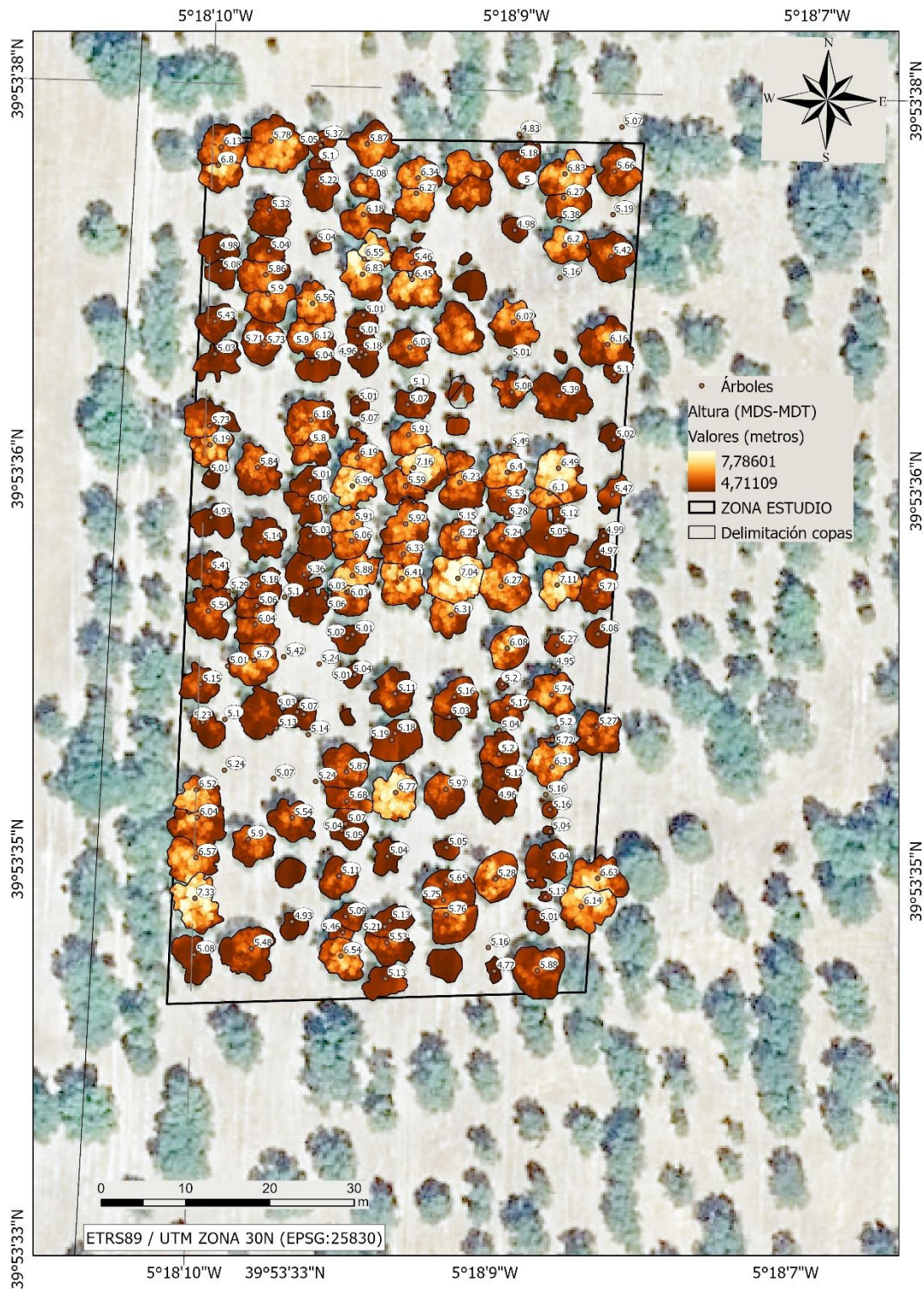


Figura 39. Plano de máscaras asociado a la altura máxima de cada alcornoque. Anejo 2, plano 4.

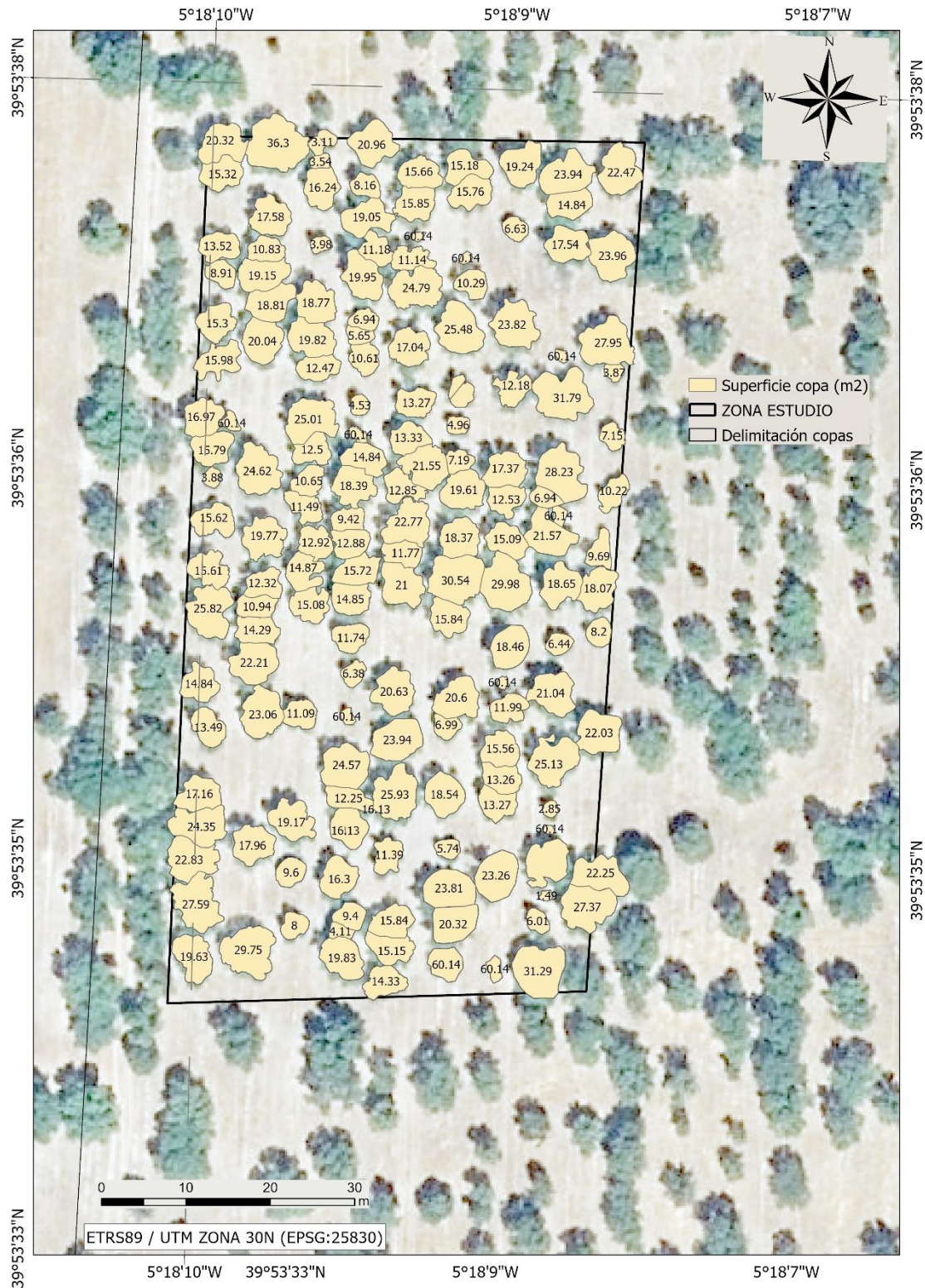


Figura 40. Plano de máscaras asociado a la superficie de cada alcornoque. Anejo 2, plano 5.

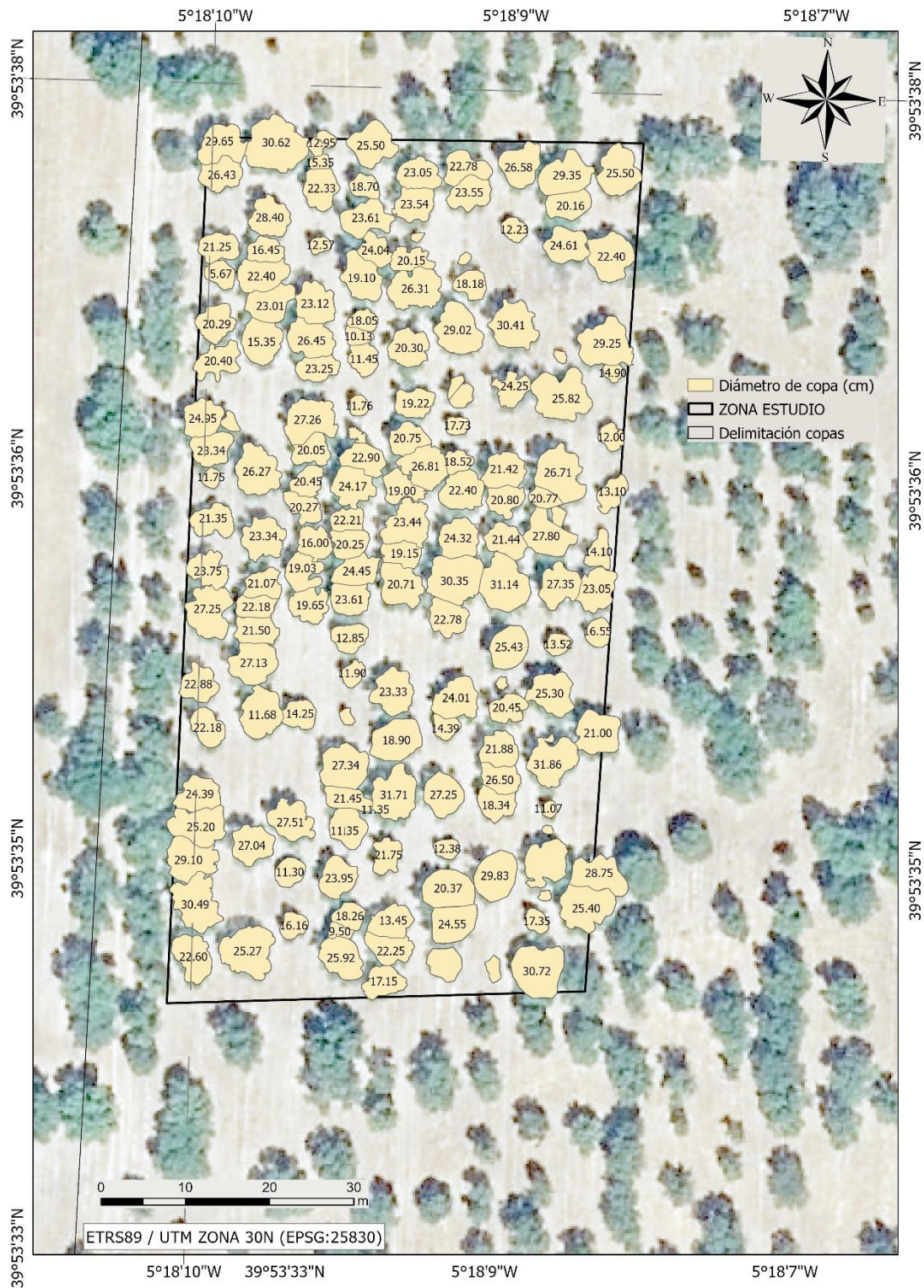


Figura 41. Plano de máscaras asociado al diámetro de cada alcornoque. Anejo 2, plano 6.

6.7 Imágenes y obtención de índices de vegetación

Para calcular los índices de vegetación en ArcGIS, se ha utilizado la herramienta de calculadora de ráster sobre las imágenes multiespectrales obtenidas del UAV (vehículo aéreo no tripulado) para poder conocer el estado de los alcornoques presentes en la finca de estudio, así como detectar precozmente enfermedades como La Seca. En el Anejo 2, planos 7,8 y 9 se pueden ver con mayor detalle los índices de vegetación (NDVI, NDRE y GNDVI respectivamente).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una medida de la salud y la densidad de la vegetación. Se calcula utilizando la información de las bandas roja e infrarroja de las imágenes satelitales o de otro tipo de imágenes. El NDVI asigna valores a la vegetación en función de la diferencia entre la reflectancia en el infrarrojo cercano y la reflectancia en el rojo. Este índice proporciona información sobre la cantidad y la calidad de la vegetación, lo que resulta útil en aplicaciones como la monitorización del crecimiento de los cultivos, la evaluación de la salud de los ecosistemas y la detección de cambios en el uso del suelo. Los valores de NDVI oscilan entre -1 y 1, donde los valores más altos indican una vegetación más densa y saludable.

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

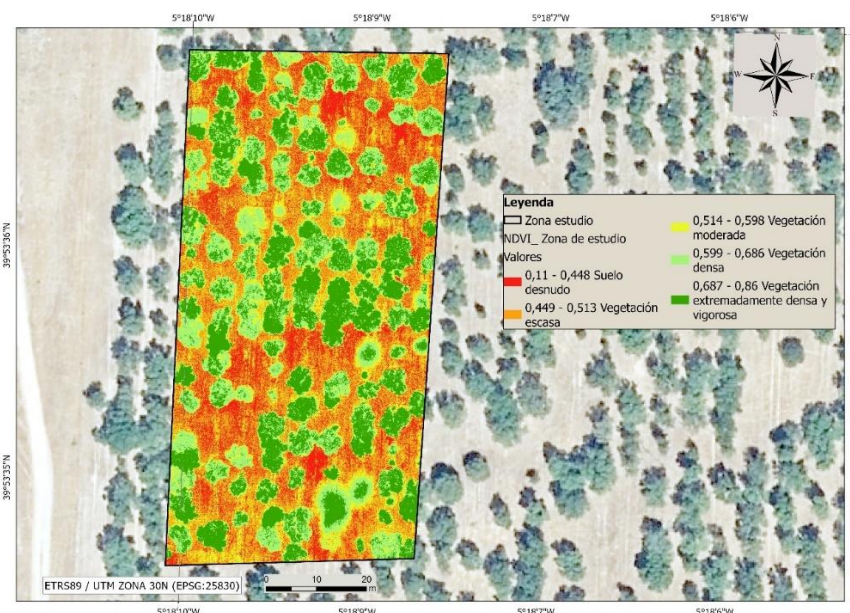


Figura 42. NDVI de la finca de estudio perteneciente al día 20 de mayo de 2024. Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG:25830). Fuente: elaboración propia. ArcGIS Pro.

Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE)

El Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) es una medida de la salud y la densidad de la vegetación que se utiliza en aplicaciones agrícolas y de teledetección. Similar al NDVI, el NDRE se calcula utilizando la información de las bandas roja e infrarroja cercana de las imágenes satelitales o de otro tipo de imágenes. Sin embargo, a diferencia del NDVI, el NDRE utiliza la banda de borde rojo en lugar de la banda roja estándar. El NDRE es especialmente sensible a la clorofila, lo que lo hace útil para evaluar la salud de la vegetación, especialmente en cultivos. Al igual que el NDVI, los valores de NDRE oscilan entre -1 y 1, donde los valores más altos indican una vegetación más densa y saludable.

$$NDRE = \frac{NIR - RED\ EDGE}{NIR + RED\ EDGE}$$

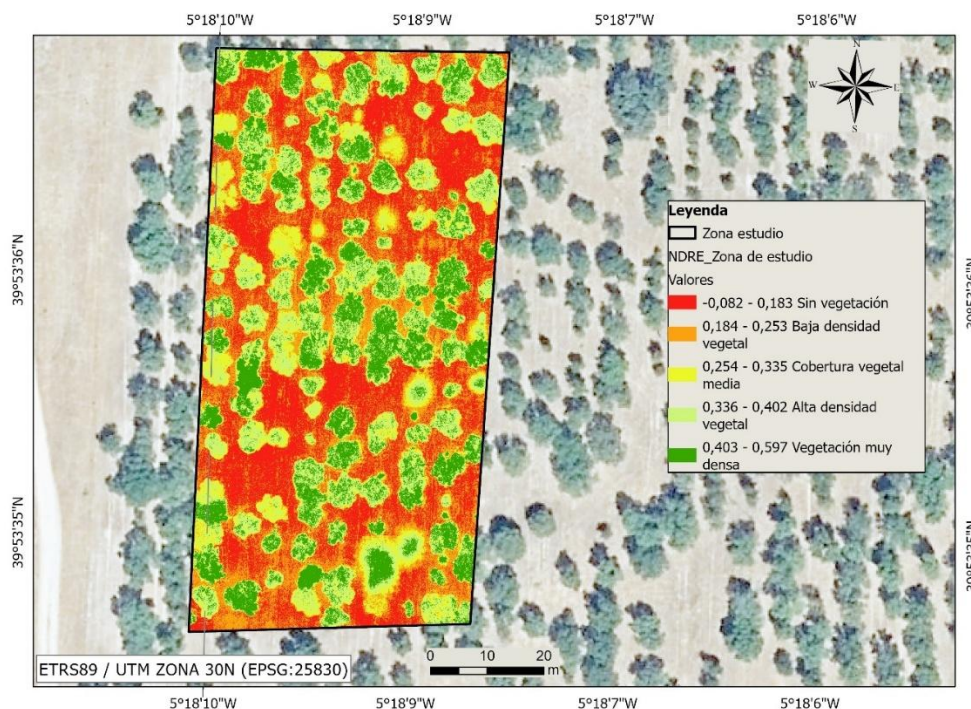


Figura 43. NDRE de la finca de estudio perteneciente al día 20 de mayo de 2024. Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG 25830). Fuente: elaboración propia. ArcGIS Pro.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) es una medida de la salud y densidad de la vegetación que se enfoca específicamente en la detección de la vegetación verde y su vigor. A diferencia del NDVI, el GNDVI utiliza la banda verde en lugar de la banda roja, lo que lo hace más sensible a la clorofila y menos afectado por el brillo del suelo. Esto lo hace especialmente útil para evaluar la salud de la vegetación en áreas con suelos desnudos o con poca cobertura vegetal. El GNDVI se utiliza en aplicaciones de teledetección para monitorear la salud de los cultivos, evaluar la vegetación en entornos naturales y estudiar los cambios en el uso del suelo. Los valores de GNDVI también oscilan entre -1 y 1, donde los valores más altos indican una vegetación más densa y saludable.

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

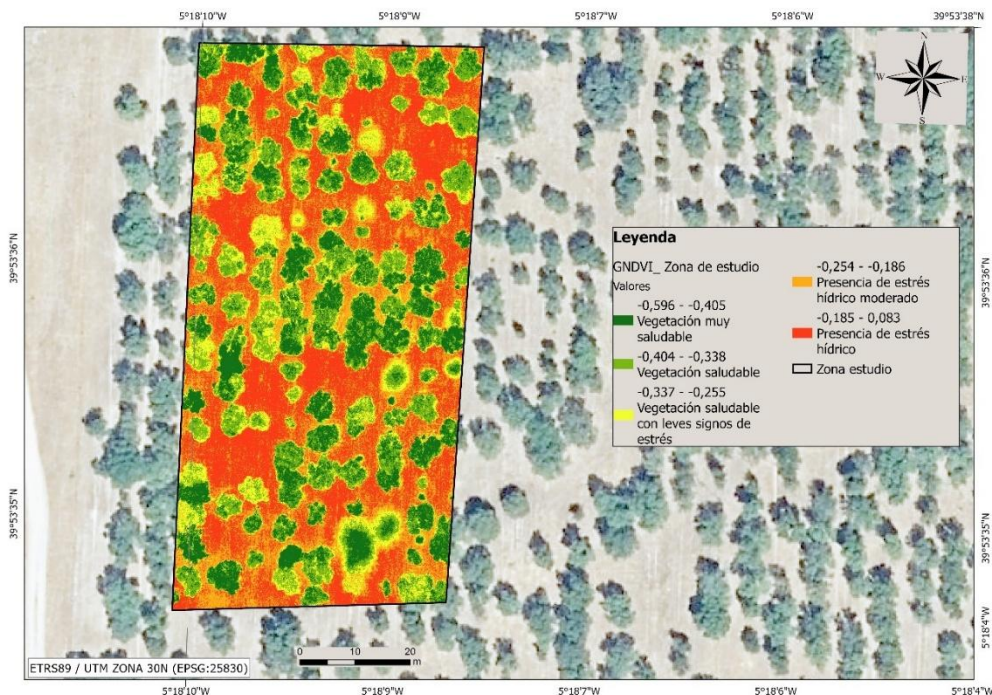


Figura 44. GNDVI de la finca de estudio perteneciente al día 20 de mayo de 2024. Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N (EPSG:25830). Fuente: elaboración propia. ArcGIS Pro.

7 RESULTADOS

Tras haber descrito en detalle la metodología que se ha empleado para la estimación de la biomasa mediante técnicas geoespaciales, en este apartado se van a presentar los resultados obtenidos, así como la correlación existente entre los datos de altura y diámetro de los troncos que han sido adquiridos y las ecuaciones para estimar la biomasa del alcornocal.

Estas ecuaciones han sido aplicadas a 80 alcornoques seleccionados por tener instalados dendrómetros de banda, ya que estos cuentan de un buen estado sanitario.

7.1 Estimación de la biomasa a partir de la ecuación alométrica

Para la estimación de la biomasa se ha empleado en primer lugar una ecuación alométrica obtenida a partir de (Montero, Ruiz-Peinado, & Muñoz, 2005):

$$b = a \times d^{\beta}$$

Esta ecuación no es lineal, por lo que se linealiza tomando logaritmos en ambos términos de la ecuación, resultando una ecuación de la forma:

$$\ln b = \alpha + \beta \times \ln d$$

Siendo:

b: biomasa seca total o de alguno de los componentes del árbol.

d: diámetro normal

α, β : parámetros estimados para el modelo

Ln: logaritmo neperiano

La determinación de la biomasa forestal se realiza mediante un muestreo destructivo que implica la selección de varios árboles con distintos diámetros. Este proceso incluye individuos representativos de cada especie, que se encuentran en masas forestales de densidad media y en estaciones con condiciones ambientales típicas para dicha especie. Los árboles seleccionados deben mostrar un crecimiento normal, estar sanos y bien conformados, excluyendo aquellos que presenten signos de debilidad, deformaciones o efectos de borde.

Los árboles seleccionados se miden en pie para registrar el diámetro a la altura del pecho y, una vez talados, se determina su altura total. Posteriormente, se realiza el desramado y la biomasa se separa en diferentes fracciones:

- Fuste.
- Ramas con un diámetro superior a 7 cm.
- Ramas con diámetros entre 2 y 7 cm.
- Ramillas con diámetros inferiores a 2 cm.
- Hojas o acículas, si se han separado.

Para cada fracción de biomasa se elaboran modelos de regresión que permiten estimar el peso seco en función del diámetro normal. Tras evaluar diversas ecuaciones, se optó por un modelo alométrico transformado en su forma logarítmica. Aunque en algunos casos este modelo presenta un coeficiente de determinación menor que otros, ofrece mejores resultados para clases diamétricas pequeñas. El diámetro normal se utiliza como variable independiente, lo que facilita la aplicación de estos modelos a los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN).

El modelo seleccionado relaciona la biomasa seca total, o de sus diferentes fracciones (en kilogramos), con el diámetro del árbol (en centímetros). La transformación logarítmica simplifica los cálculos y mejora la precisión estadística en la mayoría de los casos. Sin embargo, este tipo de transformación tiende a introducir un sesgo que subestima los valores reales (Baskerville, 2011).

Para corregir este sesgo, es necesario aplicar un factor de corrección (CF), que se calcula a partir del error estándar de la estimación (SEE), siguiendo la fórmula propuesta por Sprugel (1983):

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}}$$

Por tanto, desde la ecuación logarítmica se llega a obtener los valores modulares de biomasa (kg de materia seca) con la re-transformación y aplicación del coeficiente de corrección, utilizando los parámetros de la tabla 13.

$$\ln b = a + b \times \ln d \rightarrow b = CF \times A \times d^b$$

Donde: $A = e^a$

Y	Parámetros		R ² _{adj}	SEE
	a	b		
BT	-3,36627	2,60685	0,914	0,416653
BF	-3,01942	2,25213	0,893	0,405357
BR ₇	-6,43076	3,21136	0,870	0,574419
BR ₂₋₇	-3,3924	1,99526	0,796	0,525534
BR ₂	-5,33638	2,10315	0,676	0,754127
BH	-6,05826	2,14483	0,648	0,818511
Br	-2,81593	2,07774	0,924	0,356549

Tabla 13. Valor de los parámetros de la función (a y b), del coeficiente de determinación ajustado (R²) y el error estándar de la estimación (SEE) para *Quercus suber* y fracción de biomasa

(Montero et al., 2005)

7.2 Estimación de la biomasa a partir de la densidad y la altura

Para la estimación de la biomasa se utilizan los diámetros de los alcornoques con tronco superior a 10 cm y la altura.

El volumen se calcula con el diámetro del tronco y la altura total de cada alcornoque, y la fórmula empleada (Brown, Gillespie, & Lugo, 1989) para este cálculo es:

$$BT = V * D$$

Donde el volumen se calcula como:

$$V = \frac{\pi}{4} \times \frac{d^2}{10.000} \times h \times Ff$$

Siendo:

V: volumen del alcornoque (m³)

D: densidad del alcornoque (kg/m³)

d: diámetro del tronco (cm)

h: altura total (m)

Ff: factor de forma (considerando un valor similar al de latifoliadas: 0,7)

La densidad se puede estimar en 546 kg/m³ en frondosas y en 438 kg/m³ en maderas blandas, en el caso del alcornoque al tratarse de una frondosa se escogerá el valor de 546 kg/m³ para determinar su densidad (Forest, 2022).

	DBH (cm)	Altura (m)	Fórmula alométrica (kg)	Fórmula general (kg)
202	26,437893	7,092407	176,621898	148,808554
206	20,2920564	5,666412	88,9130397	70,0391446
209	23,3488564	6,727631	127,918924	110,096612
214	22,8825831	5,899628	121,396547	92,7289389
215	22,1891409	5,736725	112,084258	84,7862782
216	24,3924254	6,901703	143,291241	123,266993
219	30,4982452	7,678192	256,058614	214,382452
221	30,6298592	6,781891	258,942496	190,994724
223	16,457093	6,11731	51,7509163	49,7333026
225	23,0120592	6,640778	123,186517	105,562701
228	26,2726902	6,310852	173,768888	130,760824
229	23,3499888	5,641235	127,935022	92,3268691
230	21,079617	5,738342	98,1294628	76,5406987
231	22,1837296	6,597778	112,013395	97,4647089
233	27,1375747	6,670959	189,025705	147,472451
235	11,6852057	5,676056	21,5463012	23,2648339
236	27,0450621	6,450165	187,355738	141,620901
237	25,2710621	6,045654	157,081179	115,896639
241	22,3335522	5,73584	113,98568	85,8802303
242	12,717724	5,900085	26,7210436	28,6455801
243	23,1205127	6,798187	124,698365	109,085893
246	27,2667832	6,459534	191,373434	144,161589
249	20,2730338	5,619476	88,6973735	69,3288307
251	19,0334874	5,778961	75,3359735	62,8444695
252	19,6500648	5,499603	81,8130018	63,7440832
256	27,5181973	6,171295	195,993125	140,280347
258	16,1600226	5,115082	49,3784574	40,0974813
261	23,6199916	6,412842	131,809281	107,396612
262	24,043724	7,436401	138,03439	129,046679
265	10,1310423	5,22226	15,0371101	16,0896764
269	11,7608874	5,187469	21,9018858	21,53854
272	24,1735944	7,28125	139,978045	127,722958
273	22,2112564	6,581482	112,374162	97,4654095
275	24,4550564	6,96875	144,248345	125,104458
276	23,611755	6,732147	131,690036	112,665434
281	27,3415494	6,040802	192,740136	135,556832
286	23,9594001	6,003357	136,781387	103,449076
287	18,2650902	5,808014	67,7231997	58,1636781
290	25,923417	6,828369	167,831318	137,746965
292	23,5448198	6,52948	130,723451	108,655046
294	26,3192536	7,192505	174,570119	149,557389
297	19,2208959	5,653961	77,269614	62,7018888

299	26,8120846	7,668335	183,190718	165,478967
301	23,4497212	6,56839	129,357744	108,421363
303	20,714555	6,906555	93,7872083	88,9596888
304	23,3364677	6,136566	127,742887	100,317387
307	31,7135128	7,331268	283,45141	221,334116
314	22,7883381	6,330963	120,103826	98,6905675
317	18,1864536	5,283966	66,9724032	52,4610059
319	29,0236846	6,82016	225,098741	172,456759
320	17,7308142	5,38925171	62,7240049	50,8588326
323	18,5281268	6,171967	70,2725363	63,601475
327	24,3207803	7,226288	142,201219	128,307145
329	22,7878818	6,721741	120,097589	104,778036
330	24,0079972	6,143066	137,502648	106,286379
331	14,393355	5,236145	36,6694474	32,5623921
334	12,3870283	5,553986	24,9868717	25,5811227
337	20,3775043	6,328033	89,8858093	78,8771639
340	26,5865691	5,878845	179,214106	124,737538
343	12,2366958	5,3172	24,2226743	23,8996692
344	30,4186677	6,507141	254,324611	180,738702
348	21,4211128	6,798187	102,302307	93,6392067
352	21,4401719	6,278809	102,538377	86,6391856
353	31,1452171	6,981812	270,427618	203,297219
354	25,4328395	6,954376	159,706111	135,02943
356	20,4588001	5,899902	90,8174139	74,1285796
359	21,8802029	5,817291	108,082884	83,5995698
361	18,348972	5,273834	68,5298195	53,3004031
363	29,8360875	6,904144	241,850923	184,49056
366	20,1631155	6,364136	87,4575437	77,6667788
368	24,6147973	6,571625	146,707331	119,521453
370	25,8289438	5,8284	166,247188	116,719443
371	26,7151916	7,374359	181,475549	157,987027
372	20,7738874	6,540466	94,484656	84,72758
375	27,3538846	7,240326	192,966196	162,621029
376	13,5282423	5,482666	31,2867119	30,1200093
381	31,861017	6,915955	286,893831	210,742434
383	11,0722451	5,500977	18,8007389	20,2437879
386	20,2651916	5,26412964	88,6085578	64,8946014
389	30,7272114	6,286804	261,088494	178,179108
Total			10.329,8078	8.318,57249

Tabla 14. Resultados obtenidos a partir de dos ecuaciones (general y alométrica) a partir de datos de altura (obtenidos de la nube de puntos del vuelo LiDAR) y la altura (obtenida de los dendrómetros de banda)

En la figura 45 se muestra una gráfica de los resultados obtenidos por medio de las dos fórmulas, donde se puede observar que a pesar de ser ecuaciones completamente distintas los resultados tienen, a grandes rasgos, una relación directamente proporcional. Además, las estimaciones son muy parecidas lo que evidencia la consistencia de ambos modelos.

La estimación de la biomasa es esencial para evaluar la capacidad de los ecosistemas forestales, como los alcornocales, de secuestrar carbono y mitigar el cambio climático. Además de su papel en el ciclo del carbono, la estimación de la biomasa permite evaluar la salud y productividad de los árboles, detectar tempranamente signos de estrés hídrico o enfermedades como La Seca, y optimizar las prácticas de gestión forestal para maximizar el almacenamiento de carbono y la resiliencia de los ecosistemas.

Además, el cálculo de índices de vegetación permite proporcionar información precisa sobre el estado de los árboles, evaluando su salud y productividad y permite detectar zonas afectadas por sequía o la detección temprana de enfermedad como La Seca.

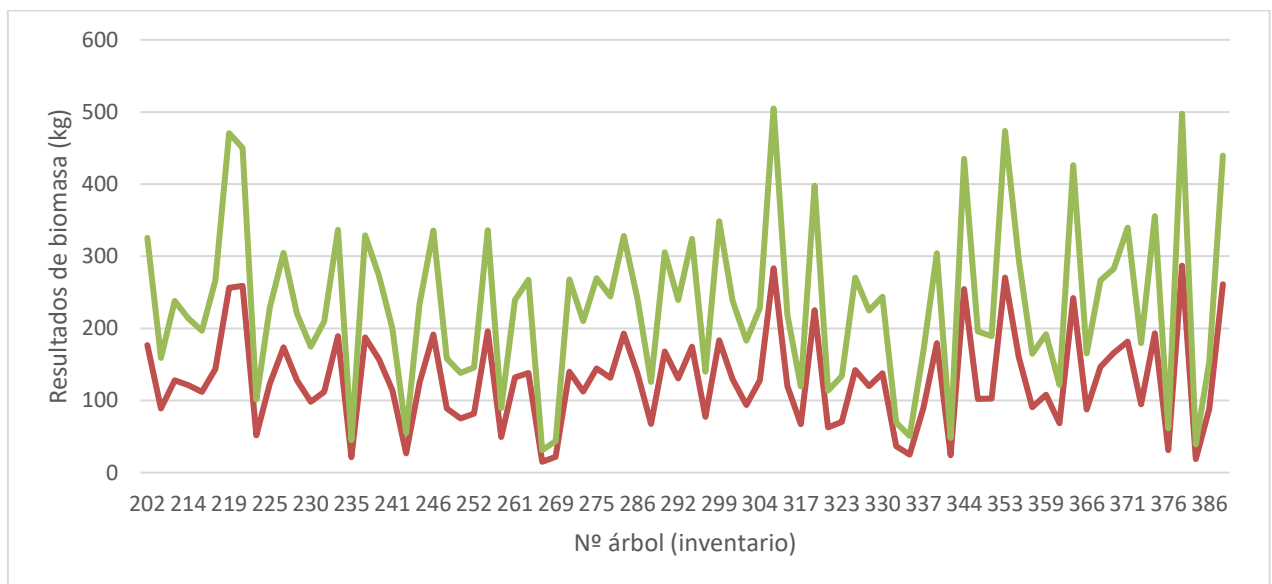


Figura 45. Valores de biomasa estimados por medio de la ecuación alométrica y por fórmula general

7.3 Análisis de los resultados

En este apartado se realiza una comparación de los modelos empleados a través de distintos parámetros estadísticos y se evalúa la relación entre las variables independientes (diámetro y altura) y la variable dependiente (biomasa) mediante un análisis de regresión. Esto permite determinar cuál de los modelos presenta un mejor ajuste a los datos. Además, se representan los resultados mediante gráficas de dispersión, lo que facilita la visualización y permite contrastar la relación entre las variables.

7.3.1 Relación entre el diámetro y la biomasa

Se observa una correlación positiva entre el diámetro y la biomasa estimada. A medida que el diámetro aumenta, los valores de biomasa también se incrementan, siendo este efecto especialmente notable en diámetros superiores a 25 cm, donde las diferencias se vuelven significativamente mayores, como se muestra en la Tabla 15.

Nº árbol	Altura (m)	Diámetro DBH (cm)	Biomasa por ecuación alométrica (kg)	Biomasa por fórmula (kg)
376	5,48	13,52	31,28	30,12
381	6,91	31,86	286,89	210,74

Tabla 15. Relación entre el diámetro y la biomasa en dos ejemplares con diámetros muy diferenciados

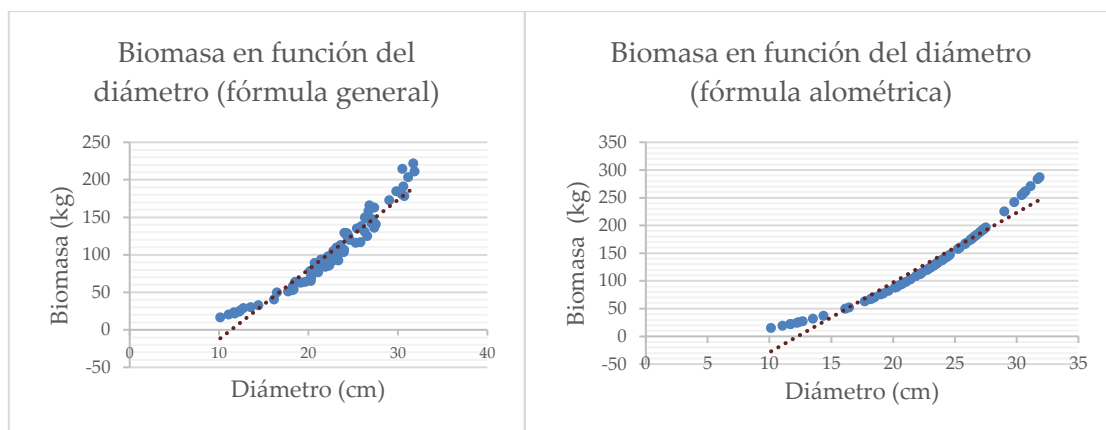


Figura 46. Gráfico de dispersión donde se pueden observar las correlaciones entre el diámetro con los valores de biomasa obtenidos a partir de las dos ecuaciones. Fuente: Excel

7.3.2 Relación entre la altura y la biomasa

Las alturas obtenidas a partir de la nube de puntos generada mediante el vuelo LiDAR muestran una correlación positiva con la biomasa, al igual que con el diámetro. Sin embargo, esta correlación es considerablemente menor en comparación con la del diámetro. En casos aislados y específicos, la relación puede incluso ser negativa, lo que refuerza la mayor influencia del diámetro en la estimación de la biomasa, como se muestra en la Tabla 16.

Nº árbol	Altura (m)	Diámetro DBH (cm)	Biomasa por ecuación alométrica (kg)	Biomasa por fórmula (kg)
251	5,77	19,03	75,33	62,84
252	5,49	19,65	81,81	63,74

Tabla 16. Relación entre la altura y la biomasa, en un caso donde al aumentar la altura no aumenta la biomasa

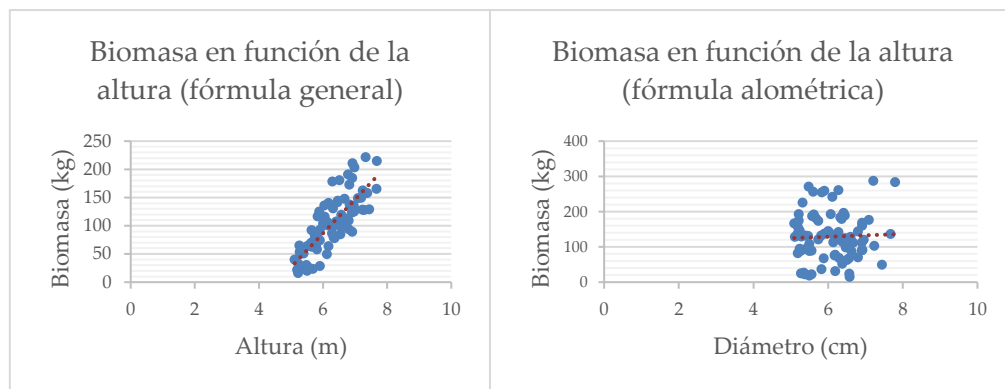


Figura 47. Gráfico de dispersión donde se pueden observar las correlaciones entre la altura con los valores de biomasa obtenidos a partir de las dos ecuaciones. Fuente: Excel

Al analizar las gráficas de dispersión, se observa que la relación entre la altura y la biomasa estimada mediante la ecuación general es significativamente mayor. Esto se debe a que dicha ecuación incorpora la variable altura, mientras que la ecuación alométrica no. Como resultado, aunque la altura también desempeña un papel en la estimación de la biomasa, el diámetro sigue siendo la variable con mayor peso en la correlación con la biomasa.

En la figura 48 se puede observar que a pesar de que la altura no sea la variable con mayor influencia en la estimación de la biomasa tiene una relación directamente proporcional con los valores del diámetro y, por tanto, con la biomasa estimada.

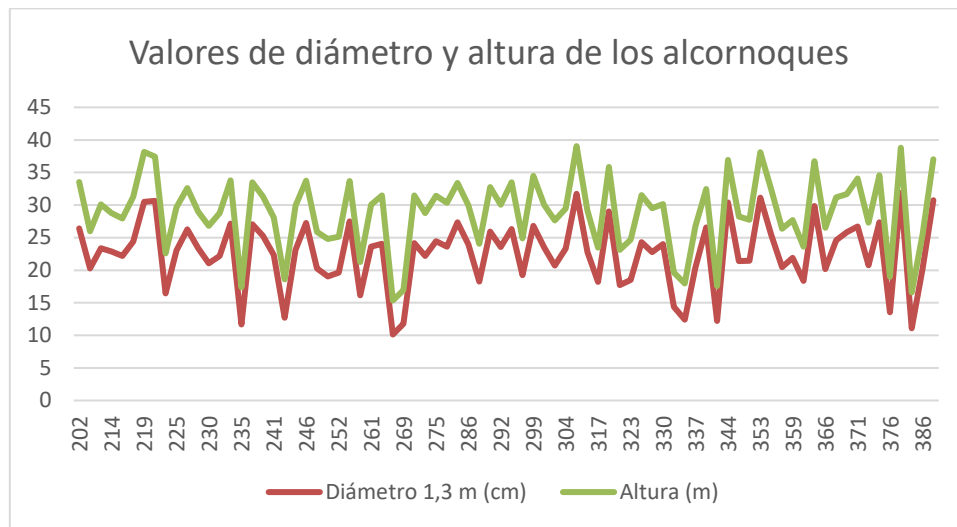


Figura 48. Valores de diámetro a 1,3 metros expresado en cm y valores de altura en metros

7.3.3 Análisis de regresión y comparación de modelos

Tras analizar las relaciones entre las distintas variables y la biomasa estimada, se procede a evaluar el desempeño de ambos modelos mediante un análisis de regresión.

	Modelo ecuación general	Modelo ecuación alométrica
R² ajustado	0,95	0,94
Error típico	10,12	16,1
F (significancia global)	915,19	645,62
Coef. de diámetro	7,78 (significativo)	12,58 (significativo)
Coef. de altura	16,78 (muy significativo)	-0,42 (no significativo)

Tabla 17. Análisis de regresión de ambos modelos. Fuente: Excel

Ambos modelos presentan un R² ajustado elevado, lo que indica una buena capacidad explicativa, aunque la ecuación general muestra un mejor ajuste, explicando una mayor proporción de la variabilidad de los datos. Este mejor rendimiento también se refleja en el error típico, que es menor en la ecuación general, lo que sugiere que las predicciones son más precisas y presentan una menor dispersión.



Los valores de F (significancia global) son muy altos en ambos casos, lo que confirma que las variables incluidas en los modelos son relevantes. Sin embargo, el valor más alto en la ecuación general refuerza la idea de que este modelo se ajusta mejor a los datos observados.

En cuanto a los coeficientes de las variables, el diámetro tiene una relación altamente significativa en ambos modelos, aunque su impacto es mayor en la ecuación alométrica. Por otro lado, la altura, que no está incluida en la ecuación alométrica, no tiene una relación significativa en este modelo. En cambio, en la ecuación general, la altura se revela como una variable clave, lo que refuerza su importancia en la estimación de la biomasa.

8 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Esta evaluación económica tiene como objetivo la valoración aproximada de los beneficios que proporciona el uso de técnicas geoespaciales en la adquisición de datos, logrando un rendimiento superior en comparación con los métodos tradicionales. Esta avanzada tecnología permite la captura de información a distancia, alcanzando hasta 100 metros desde el escáner, lo que facilita la recopilación de datos en áreas de difícil acceso. Además, la digitalización en el sector forestal optimiza los procesos, permitiendo obtener resultados de manera más rápida, eficiente y con una productividad significativamente mayor.

El presente trabajo se realiza como una aportación de información al proyecto de investigación ACICORK que está financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Española de Investigación (MICIN/AEI/10.13039/501100011033) y por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) "Una manera de hacer Europa". ("Alcornocales climáticamente inteligentes (ACICORK)").

8.1 Costes del proyecto

Los costes del proyecto suponen los costes del material empleado, la mano de obra (costes de mantenimiento) y los costes de personal.

8.1.1 Costes de material

En la tabla 18 se muestran los costes asociados al material utilizado durante el desarrollo del proyecto. Los costes de los dendrómetros y el dispositivo Coveless CQ05 no se han tenido en cuenta debido a que se encontraban ya instalados y están vinculados al proyecto BIOBOR (M. Sánchez González, 2018).

Coste de material	
DJI Matrice 300 RTK	13.500 €
Medidor láser PENTAX M-100	120 €
DJI Zenmuse P1	5.995,00 €
DJI Zenmuse L1	10.500,00 €
Cámara multispectral Altum PT	19.995,00€
Leica Zeno FLX100 plus	5.286,00€
TOTAL	38.901 €

Tabla 18. Costes de instrumentación para la toma de datos y desarrollo del proyecto

8.1.2 Costes de mano de obra

Los costes de mano de obra están relacionados con la manutención del personal implicado en el proyecto, incluyendo los costes de alimentación y transporte durante la jornada de trabajo de campo realizada el 20 de mayo de 2024.

Considerando un consumo medio de gasolina de 1,6 €/L y un precio de 1,6 €/L, así como el uso de tres vehículos para un desplazamiento de 169 km, se ha realizado la siguiente estimación:

$$\frac{6 \times 169}{100} \times 1,6 = 25,95 \text{ €} \rightarrow 51,18 \frac{\text{€}}{\text{viaje}}$$

$$\text{Coste total del desplazamiento } 51,18 \frac{\text{€}}{\text{viaje}} \times 3 \text{ coches} = 153,54 \text{ €}$$

Coste de manutención del personal			
Tipo	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio (€)
Transporte	3	51,18	153,54
Comida	9	10	90
TOTAL			243,54

Tabla 19. Costes de manutención de personal incluyendo transporte y comida

8.1.3 Costes de personal

Las tareas han sido realizadas por el equipo del subproyecto 2 de ACICORK, liderado por la Universidad Politécnica de Madrid. Los investigadores principales son Alejandra Ezquerro y Tomás Herrero Tejedor, junto con Enrique Pérez-Martín, Serafín López-Cuervo y Julián Aguirre, del grupo de investigación en Geovisualización, Espacios Singulares y Patrimonio (GESyP), y José Ramón González-Adrados, del Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural.

Coste de personal			
Tipo	Precio unitario (€)	Horas	Precio (€)
Titulados superiores (grupo de investigación)	30	8	1.440
TOTAL			1.440

Tabla 20. Costes de personal del grupo de investigación

8.1.4 Costes totales

Los costes totales mostrados en la tabla 21 es el resultado del coste de material empleado en el proyecto, el coste de manutención de personal y el coste de personal.

Coste total	
Coste de material	38.901 €
Coste de manutención de personal	243,54 €
Coste de personal	1.440 €
TOTAL	40.584,54 €

Tabla 21. Costes totales

8.2 Ingresos

Los beneficios obtenidos en la zona de estudio son gracias a la extracción de corcho que se realiza normalmente cada 9 años. Cabe destacar que la finca tiene un alto valor debido a que llevan repoblados 43 años, desde 1983.

Para calcular los ingresos es necesario calcular previamente el peso de corcho (kilogramos) que se consigue de la extracción de cada uno de los alcornoques, teniendo en cuenta que no se extrae en todos. Para ello vamos a emplear la fórmula propuesta por (Moreno-fernández et al., 2022):

$$V_{\text{corcho}} = HD \times c \times \text{cap}$$

$$\text{cap} = 2 \times \pi \times r$$

$$V_{\text{corcho}} = 1,3 \times 0,0126 \times (0,213 \times \pi) = 0,011 \text{ m}^3$$

$$P_{\text{corcho}} = \text{densidad media} \times V_{\text{corcho}}$$

$$P_{\text{corcho}} = 256,77 \times 0,035 = 2,81 \text{ kg}$$

$$P_{\text{corcho total}} = 2,81 \times 80 \text{ alcornoques} = \mathbf{449,6 \text{ kg de corcho en total}}$$

Donde,

V_{corcho} : volumen de corcho (m^3)

HD: altura de descorche (m)

c: calibre (m)

cap: circunferencia del árbol a la altura del pecho (m)

P_{corcho} : peso del corcho por árbol (kg)



Densidad media: para este valor se ha tomado como referencia 256,77 kg/m³ según (Dehane, 2018)

Para estimar el precio del corcho por kilogramo, se ha tomado como referencia la información de un artículo (Columbia Jerez, 2024), en el que se indica que el precio medio actual del corcho es de 100 euros por quintal castellano, una antigua unidad de peso equivalente a 46 kilogramos.

$$2,17 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \times 449,6 \text{ kg} = 977,39 \text{ €}$$

Por lo que podríamos obtener un ingreso de 977,39 € cada 9 años aproximadamente en la finca de estudio mediante la extracción de corcho de los 160 alcornoques.



9 CONCLUSIONES

El presente estudio ha tenido como objetivo principal la estimación de la biomasa aérea en un alcornocal de 43 años en Calzada de Oropesa (Toledo), mediante la integración de técnicas geoespaciales avanzadas. La implementación de sensores aéreos embarcados en UAV y el uso de GNSS de alta precisión han permitido la obtención de datos con una exactitud superior a la de los métodos tradicionales, optimizando la recopilación de parámetros dendrométricos y facilitando la generación de un inventario detallado.

Las imágenes obtenidas a través de los sensores embarcados en el UAV han demostrado ser una herramienta altamente eficiente para la gestión forestal, permitiendo la identificación y georreferenciación precisa de cada individuo arbóreo. La adquisición de datos a través de la nube de puntos generada por el sensor LiDAR ha permitido la obtención de parámetros esenciales como la altura, posibilitando una estimación más precisa de la biomasa.

Asimismo, se ha realizado un análisis de correlación entre los parámetros obtenidos y las ecuaciones empleadas para la estimación de biomasa, verificando la validez de los resultados y evidenciando la influencia del diámetro y la altura en la modelización de la biomasa aérea. Del mismo modo, se ha evaluado la relación entre los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multiespectrales y la vigorosidad del arbolado, proporcionando información adicional sobre el estado de la masa forestal.

Desde el punto de vista de la productividad y el rendimiento, la integración de técnicas de geoposicionamiento y sensores aéreos ha reducido significativamente el tiempo y los costos asociados a la recopilación de datos, ofreciendo un proceso más eficiente en comparación con los inventarios forestales tradicionales. Esta metodología no solo mejora la precisión en la cuantificación de la biomasa, sino que también representa una herramienta de gran utilidad para la planificación y gestión sostenible de los recursos forestales.

En conclusión, el uso de tecnologías geoespaciales aplicadas a la gestión forestal supone una alternativa eficiente y precisa frente a los métodos convencionales, optimizando la evaluación de la biomasa y contribuyendo a una gestión forestal más efectiva y sostenible.



10 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

La Seca es uno de los principales problemas fitosanitarios causados en alcornoques desde finales de los años 80, que provocan el decaimiento y muerte de algunas especies del género *Quercus*, especialmente a encinas y alcornoques. Los síntomas podrían estar relacionados con factores climáticos, patológicos y selvícolas, donde se diferencian dos síntomas: el primero de ellos es el decaimiento lento o progresivo (la denominada muerte lenta), que se caracteriza por la caída gradual de las hojas, presencia de ramas parcial o totalmente defoliadas y un deterioro generalizado que lleva a la muerte del árbol al cabo de unos años. El segundo es la muerte súbita, caracterizado por un rápido secado de las ramas, donde las hojas permanecen un tiempo adheridas, con un color amarillento o marrón en las primeras etapas de desecación. En este caso la muerte se produce a las pocas semanas después de la aparición de los primeros síntomas como podemos ver en la figura 49. (Rodríguez-Molina et al., 2012)

En 1991 y 1992 el Profesor Brasier realizó una serie de prospecciones en Castilla-La Mancha, Extremadura, Andalucía y algunas zonas de Portugal. El resultado de sus estudios fue la detección de un Oomycete patógeno, denominado *Phytophthora cinnamomi* Rands, en las raíces de árboles afectados por Seca (BRASIER, 1992; BRASIER et al., 1993). Este Oomycete microscópico que habita en el suelo y se desarrolla en presencia de agua libre, multiplicándose rápidamente mediante esporas. Este organismo afecta a las raíces y el cuello de los árboles, provocando su debilitamiento y, en muchos casos, la muerte.

El desarrollo de la enfermedad depende de varios factores ambientales, especialmente de la temperatura y la disponibilidad de agua. Las primaveras lluviosas seguidas de veranos secos y calurosos favorecen su propagación, ya que el patógeno se activa con la humedad, mientras que el estrés hídrico debilita a los árboles, haciéndolos más vulnerables.

Además de las condiciones climáticas, el manejo forestal inadecuado también influye en la propagación de la enfermedad. Una gestión deficiente de la dehesa puede aumentar la susceptibilidad de los árboles al ataque del patógeno.

El control de la seca es complejo debido a la capacidad de *P. cinnamomi* de sobrevivir en el suelo por largos períodos. Las estrategias de mitigación incluyen el uso de antagonistas biológicos, la aplicación de fungicidas, mejoras en la calidad del suelo y prácticas selvícolas adecuadas para fortalecer la resistencia de los árboles.

La detección temprana es clave para su control, y en este sentido, el uso de imágenes con algoritmos de análisis de vegetación permitiría identificar patrones asociados al estrés hídrico y la defoliación, facilitando una gestión forestal más eficiente.

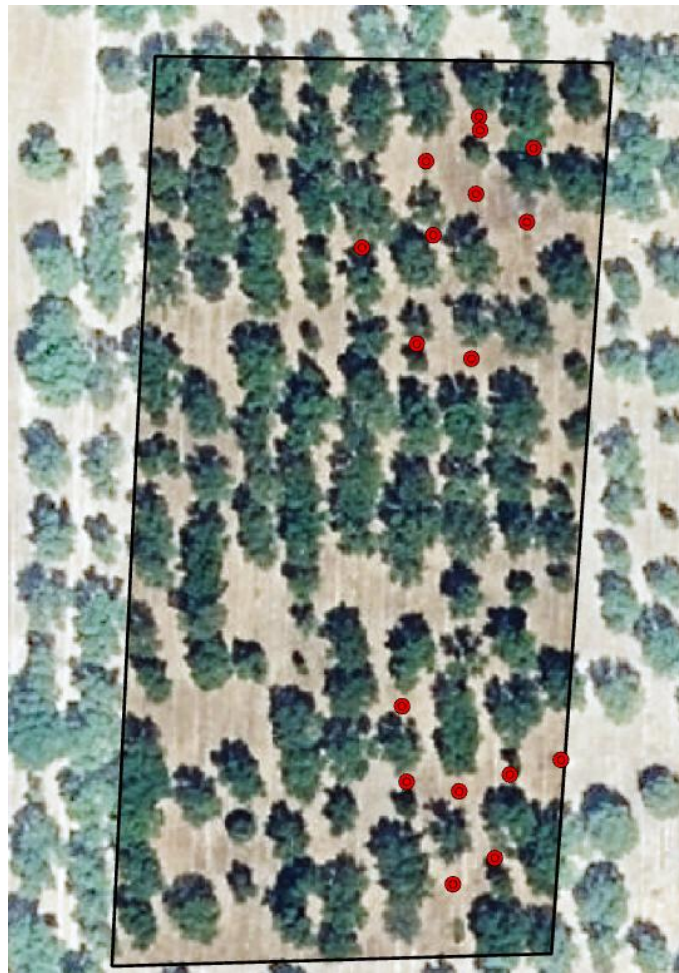


Figura 49. Alcornoques muertos causado por la enfermedad de La Seca



Figura 50. Tocones y restos de alcornoques afectados por La Seca que han provocado la muerte

Además de continuar con la investigación sobre la enfermedad de la seca en los alcornocales, se plantea una nueva línea de estudio centrada en la aplicación de la inteligencia artificial (IA) en la estimación de biomasa y el análisis forestal, para automatizar y optimizar la gestión forestal.

La implementación de redes neuronales y algoritmos de aprendizaje automático podría mejorar la capacidad predictiva de los modelos de estimación de biomasa, permitiendo el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos obtenidos mediante UAV y sensores remotos. Además, el uso de IA podría facilitar la detección y clasificación automática de especies (Deep Learning), la detección de anomalías en la vegetación y la integración de múltiples fuentes de información para una evaluación más precisa del estado de los alcornocales.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Adena, W. ¿Qué es el corcho? Retrieved from <https://www.barnacork.com/ques-el-corcho/>
- Aguilar Ruiz, T. (2021). *Análisis y seguimiento del cultivo del olivo con cámaras RGB y multiespectrales embarcadas en UAV*. (Grado en Ingeniería Geomática). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Alcornoces climáticamente inteligentes (ACICORK). Retrieved from <https://acicork.com/>
- Alfonso Carbajosa, E. (2023). *Agricultura de precisión: Análisis sobre el cultivo del olivo comparando imágenes satelitales con imágenes obtenidas con UAV*. (Máster en geomática aplicada a la ingeniería y a la arquitectura). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Almorox Alonso, J., de Antonio García, R., & Saa Requejo, A. (2004). *Metodología para la elaboración de estudios aplicados de climatología*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Agrónomos .
- Analytics, E. D. (2024). Índices De Vegetación En La Agricultura Digital.
- Esri. (2023). *ArcGIS Pro* (versión 3.1) (Software de sistema de información geográfica). Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/>
- Baskerville, G. L. (2011). Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. In.
- Brown, s., Gillespie, a., & Lugo, a. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *FOREST SCIENCE*, 35(4), 881-902.
- Carolina Varela, M. (1999). EL ALCORNOQUE, ANTES DE LA INDUSTRIA. "El corcho y los alcornocales.". In.
- Columbia Jerez, A. (2024). *El expolio del corcho, la valiosa materia prima de la que España es el segundo productor mundial*. Retrieved from <https://www.abc.es/economia/expolio-corcho-material-espana-segundo-productor-mundial-20240217163651-nt.html>
- Dehane, B. (2018). Caracterización del crecimiento y de la calidad de corcho de los alcornocales del Noroeste de Argelia (región de Orán). In: Asociación Española de Ecología Terrestre.
- Enterprise, D. Zenmuse P1. Retrieved from <https://enterprise.dji.com/es/zenmuse-p1>
- Eriksson, G. (2000). Red Europea de Conservación de Recursos Genéticos de Frondosas nobles. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, ISSN 1131-7965, Vol. 9, N° 2, 2000, pags. 59-70.
- Ficha técnica del alcornoque. In.



- Forest, E. I. o. P. (2022). Cálculo de la biomasa, estimación del CO₂ almacenado en un árbol. In Ibericadron. DJI Matrice 300 RTK. Retrieved from <https://www.ibericadron.com/tienda/dji/matrice-300-rtk/matrice-300-rtk/>
- López de Heredia, U., & Gil, L. (2006). La diversidad en las especies forestales: un cambio de escala. El ejemplo del alcornoque. *Ecosistemas*, 15(2).
- Megías, M., Molist, P., & A.Pombal, M. (2023). Atlas Histología Vegetal y Animal. Órganos vegetales (tallo).
- Mercado Vázquez, V. (2023). *Diseño de un huerto urbano de 2.400 m² en el Centro Comercial de Parquesur de Leganés (Madrid) para fomentar el empleo de personas con discapacidad intelectual*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Ministerio de Agricultura, P. y A. M. Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR).
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*.
- Moreno-fernández, d., Cañellas, i., Adame, p., Santiago, r., Hernandez, l., . . . Sánchez-gonzález, m. (2022). Estado y potencialidad en la producción de corcho. Aplicación del inventario forestal nacional. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://8cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/actas/8CFE-913.pdf>
- Morgenroth, J., Nowak, D., & Koeser, A. (2020). DBH Distributions in America's Urban Forests—An Overview of Structural Diversity. In Pérez-Martín, E., López-Cuervo Medina, S., Herrero-Tejedor, T., Pérez-Souza, M. A., Aguirre de Mata, J., & Ezquerro-Canalejo, A. (2021). Assessment of Tree Diameter Estimation Methods from Mobile Laser Scanning in a Historic Garden. *Forests*, 12(8), 1013. <https://doi.org/10.3390/f12081013>
- Pix4D (2023). *PIX4Dmapper* (versión 4.8) (Software de fotogrametría y modelado 3D). <https://www.pix4d.com/>
- P.M. Díaz-Fernández, M. I. G. M. y. L. G. (1996). Alcornocales marginales en España. Estado actual y perspectivas de conservación de sus recursos genéticos.
- Rodríguez-Molina, M. d. C., Palo Núñez, E. J., Blanco Santos, A., Torres-Vila, L. M., Santiago Merino, R., del Pozo Quintanilla, J. d. D., . . . Suárez de la Cámara, M. Á. (2012). *Phytophthora cinnamomi*: un Oomycete implicado en la Seca de encinas y alcornoques. In Phytoma (Ed.).
- Sanaa, F., Imane, S., Mohamed, B., Kenza, A. E. k., Souhail, K., Lfalah, H., & Khadija, M. (2022). Biomass and Carbon Stock Quantification in Cork Oak Forest of Maamora Using a New Approach Based on the Combination of Aerial Laser Scanning Carried by Unmanned Aerial Vehicle and Terrestrial Laser Scanning Data. *Forests*, 13(8), 1211. <https://doi.org/10.3390/f13081211>



- Sánchez González, M. (2018). Informe sobre el proyecto: Bornizo para la bioeconomía, herramientas de gestión forestal y evaluación ambiental para su valorización (biobor): Dispositivo experimental Calzada de Oropesa. In.
- Sánchez González, M. d. I. O., Ezquerro Canalejo, A., Herrero Tejedor, T. R., & Cancho Godoy, B. (2022). Memoria científico- técnica: Alcornocales Climáticamente Inteligentes (ACICORK): Herramientas para la gestión y monitorización forestal, la caracterización del corcho y la lucha contra la Seca (*P.cinnamomi*). In.
- Serrada Hierro, R., & Serrada Redondo, M. (2001). *Estudio sobre biometría y morfología del sistema radical de una repoblación de alcornoque en el tm de Calzada de Oropesa (Toledo)*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Šiljeg, A., Marinović, R., Domazetović, F., Jurišić, M., Marić, I., Panđa, L., Radočaj, D., & Milošević, R. (2023). GEOBIA and Vegetation Indices in Extracting Olive Tree Canopies Based on Very High-Resolution UAV Multispectral Imagery. *Applied Sciences*, 13(2), 739. <https://doi.org/10.3390/app13020739>
- Urrechu Torres, J. (2021). Estimación de la biomasa forestal del pirineo central mediante teledetección y SIG. In.
- Vericat Grau, P., Piqué Nicolau, M., & Serrada Hierro, R. (2012). Gestión adaptativa al cambio global en masas de *Quercus mediterráneas* In.



ANEJO 1

INVENTARIO

Inventario de los 160 alcornoques ubicados en la zona de estudio donde se recogen las coordenadas geográficas (latitud y longitud), la altura (metros), la superficie de la copa (metros cuadrados), si tienen dendrómetro o no, el diámetro a la altura del pecho a 1,3 metros de altura (DBH) (centímetros) y los resultados de biomasa obtenidos tanto de la ecuación general como de la fórmula alométrica (kilogramos).

Alcornoque 201:



Latitud	Longitud
39,89382	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,37	20,32
Dendrómetro	DBH (cm)
X	29,6

Alcornoque 202:



Latitud	Longitud
39,8938	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,09	15,32
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	26,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
148,8	176,6

Alcornoque 203:



Latitud	Longitud
39,89371	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,38	13,52
Dendrómetro	DBH (cm)
X	21,2

Alcornoque 204:



Latitud	Longitud
39,89371	-5,30275
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,28	11,24
Dendrómetro	DBH (cm)
X	11

Alcornoque 205:



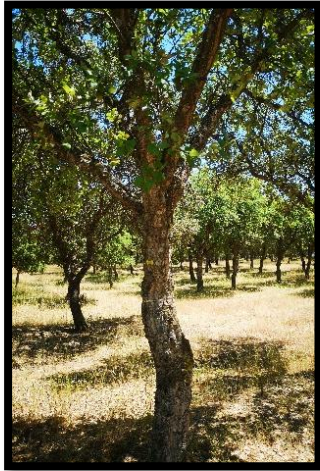
Latitud	Longitud
39,89369	-5,30276
Altura	Superficie de la copa (m ²)
4,67	8,91
Dendrómetro	DBH (cm)
X	12,3

Alcornoque 206:



Latitud	Longitud
39,89363	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,56	15,3
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
70	88,9

Alcornoque 207:



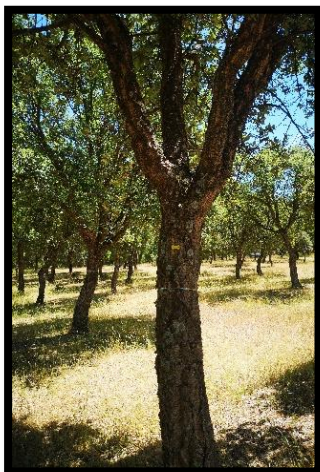
Latitud	Longitud
39,8936	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,4	15,98
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20,4

Alcornoque 208:



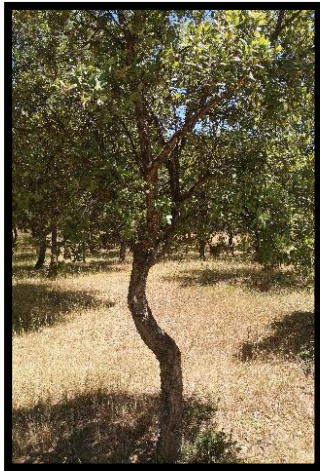
Latitud	Longitud
39,89352	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,73	18,97
Dendrómetro	DBH (cm)
X	24,9

Alcornoque 209:



Latitud	Longitud
39,8935	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,11	15,79
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
110,1	127,9

Alcornoque 210:



Latitud	Longitud
39,89347	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
4,12	4,88
Dendrómetro	DBH (cm)
X	11,7

Alcornoque 211:



Latitud	Longitud
39,89343	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,81	15,62
Dendrómetro	DBH (cm)
X	21,3

Alcornoque 212:



Latitud	Longitud
39,89337	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,05	15,61
Dendrómetro	DBH (cm)
X	23,7

Alcornoque 213:



Latitud	Longitud
39,89333	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,9	25,82
Dendrómetro	DBH (cm)
X	27,2

Alcornoque 214:



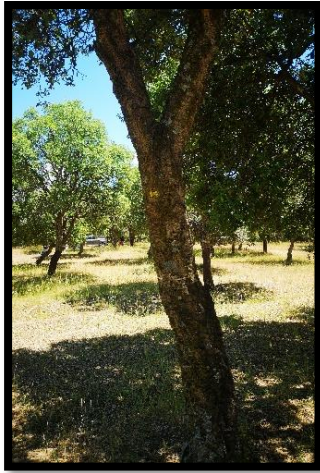
Latitud	Longitud
39,89325	-5,30278
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,74	14,84
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,9
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
92,7	121,4

Alcornoque 215:



Latitud	Longitud
39,89321	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,9	13,49
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
84,8	112,1

Alcornoque 216:



Latitud	Longitud
39,89313	-5,30278
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,8	17,16
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
123,3	143,3

Alcornoque 217:



Latitud	Longitud
39,8931	-5,30278
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,92	24,35
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	25,2

Alcornoque 218:



Latitud	Longitud
39,89306	-5,30278
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,68	22,83
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	29,1

Alcornoque 219:



Latitud	Longitud
39,89302	-5,30278
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,6	27,59
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	30,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
214,4	256,1

Alcornoque 220:



Latitud	Longitud
39,89296	-5,30277
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,78	19,63
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	22,6

Alcornoque 221:



Latitud	Longitud
39,89383	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,9	36,3
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	30,6
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
191	258,9

Alcornoque 222:



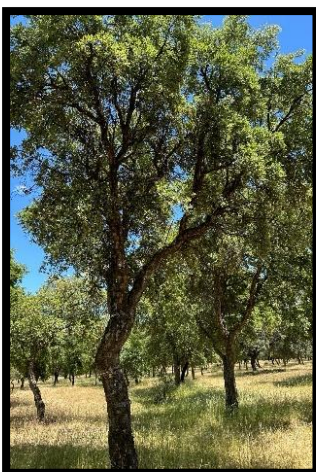
Latitud	Longitud
39,89376	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,12	17,58
Dendrómetro	DBH (cm)
X	28,4

Alcornoque 223:



Latitud	Longitud
39,89371	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,38	10,83
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	16,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
49,7	51,8

Alcornoque 224:



Latitud	Longitud
39,89369	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,64	19,15
Dendrómetro	DBH (cm)
X	22,4

Alcornoque 225:



Latitud	Longitud
39,89367	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,31	18,81
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
105,6	123,2

Alcornoque 226-227:



Latitud	Longitud
39,89362	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,64	20,04
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	15,35

Alcornoque 228:



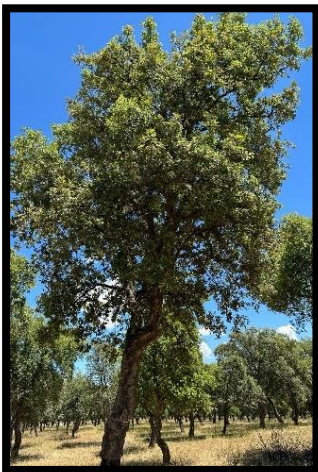
Latitud	Longitud
39,89348	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,74	24,62
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	26,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
130,8	173,8

Alcornoque 229:



Latitud	Longitud
39,8934	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,6	19,77
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
92,3	127,9

Alcornoque 230:



Latitud	Longitud
39,89335	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,47	12,32
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	21,1
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
76,5	98,1

Alcornoque 231:



Latitud	Longitud
39,89333	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,67	10,94
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
97,5	112

Alcornoque 232:



Latitud	Longitud
39,89331	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,68	19,29
Dendrómetro	DBH (cm)
X	21,5

Alcornoque 233:



Latitud	Longitud
39,89327	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,45	22,21
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	27,1
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
147,5	189

Alcornoque 234:



Latitud	Longitud
39,89322	-5,30269
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,05	23,06
Dendrómetro	DBH
✓	24,5

Alcornoque 235:



Latitud	Longitud
39,89365	-5,30269
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,56	24,8
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	11,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
23,3	21,5

Alcornoque 236:



Latitud	Longitud
39,89308	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,57	17,96
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	27
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
141,6	187,4

Alcornoque 237:



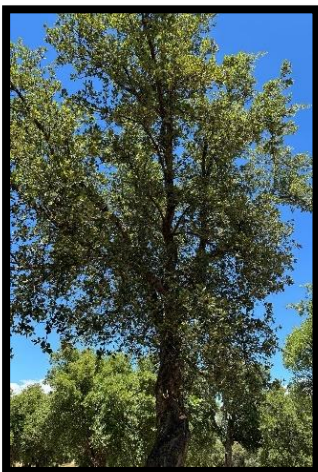
Latitud	Longitud
39,89297	-5,3027
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,19	29,75
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	25,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
115,9	157,1

Alcornoque 238-239:



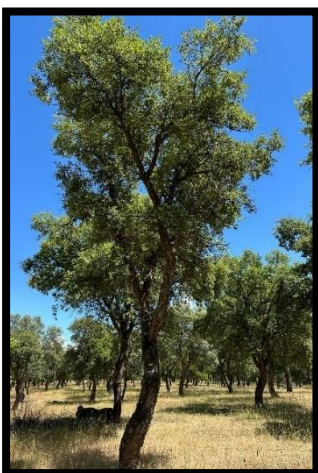
Latitud	Longitud
39,89383	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,74	17,11
Dendrómetro	DBH (cm)
X	12,9

Alcornoque 240:



Latitud	Longitud
39,89381	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,8	16,54
Dendrómetro	DBH (cm)
X	15,3

Alcornoque 241:



Latitud	Longitud
39,89378	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,39	16,24
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
85,9	114

Alcornoque 242:



Latitud	Longitud
39,89372	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
4,76	3,98
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	12,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
28,6	26,7

Alcornoque 243:



Latitud	Longitud
39,89366	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,46	18,77
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,1
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
109,1	124,7

Alcornoque 244:



Latitud	Longitud
39,89362	-5,30264
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,37	19,82
Dendrómetro	DBH (cm)
X	26,4

Alcornoque 245:



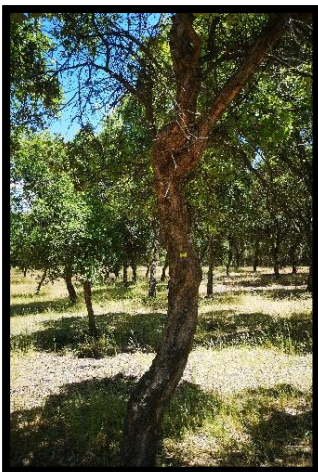
Latitud	Longitud
39,8936	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,6	12,47
Dendrómetro	DBH (cm)
X	25,2

Alcornoque 246:



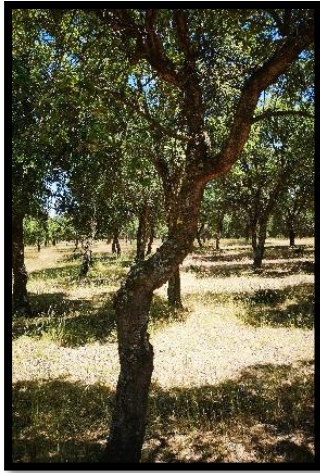
Latitud	Longitud
39,89353	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,62	25,01
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	27,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
144,2	191,4

Alcornoque 247:



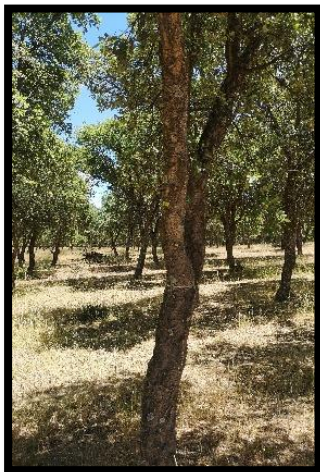
Latitud	Longitud
39,89351	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,52	12,5
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20,1

Alcornoque 248:



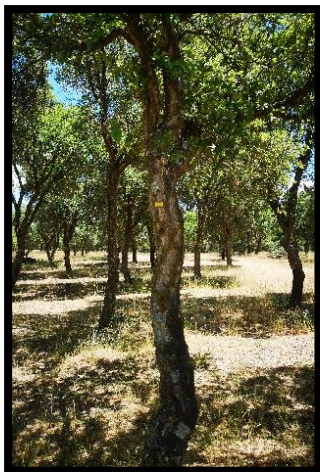
Latitud	Longitud
39,89347	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,78	10,65
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20,4

Alcornoque 249:



Latitud	Longitud
39,89344	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,5	11,49
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
69,3	88,7

Alcornoque 250:



Latitud	Longitud
39,89341	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,5	12,92
Dendrómetro	DBH (cm)
X	16

Alcornoque 251:



Latitud	Longitud
39,89337	-5,30264
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,17	14,87
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	19
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
62,8	75,3

Alcornoque 252:



Latitud	Longitud
39,89335	-5,30263
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,19	15,08
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	19,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
63,7	81,8

Alcornoque 253-254-255:



Latitud	Longitud
39,89323	-5,30264
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,52	13,09
Dendrómetro	DBH (cm)
X	12,4

Alcornoque 256:



Latitud	Longitud
39,89311	-5,30264
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,41	19,17
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	27,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
140,3	196

Alcornoque 257:



Latitud	Longitud
39,89305	-5,30265
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,44	9,6
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	11,3

Alcornoque 258:



Latitud	Longitud
39,893	-5,30264
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,44	8
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	16,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
40,1	49,4

Alcornoque 259:



Latitud	Longitud
39,89383	-5,30256
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,3	20,96
Dendrómetro	DBH (cm)
X	25,5

Alcornoque 260:



Latitud	Longitud
39,89379	-5,30256
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,22	8,16
Dendrómetro	DBH (cm)
X	18,7

Alcornoque 261:



Latitud	Longitud
39,89375	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,39	19,05
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,6
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
107,4	131,8

Alcornoque 262:



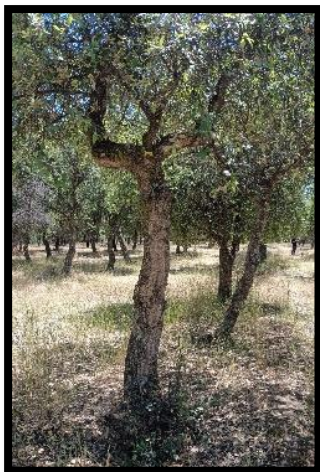
Latitud	Longitud
39,89371	-5,30256
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,19	11,18
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
129	138

Alcornoque 263:



Latitud	Longitud
39,89369	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,61	19,95
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	19,1

Alcornoque 264:



Latitud	Longitud
39,89365	-5,30256
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,28	9,94
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	18,1

Alcornoque 265:



Latitud	Longitud
39,89362	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,58	7,65
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	10,1
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
16,1	15

Alcornoque 266-267-268:



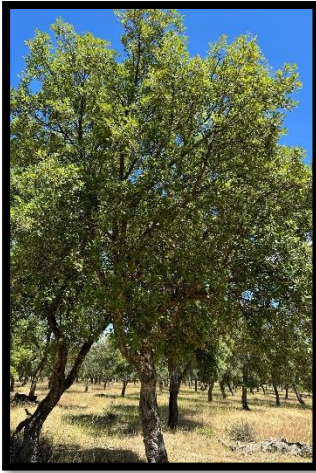
Latitud	Longitud
39,89361	-5,30256
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,42	10,61
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	9,3

Alcornoque 269:



Latitud	Longitud
39,89355	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,38	6,53
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	11,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
21,5	21,9

Alcornoque 270:



Latitud	Longitud
39,89353	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,1	17,24
Dendrómetro	DBH (cm)
X	24,68

Alcornoque 271:



Latitud	Longitud
39,89349	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,22	14,84
Dendrómetro	DBH (cm)
X	22,9

Alcornoque 272:



Latitud	Longitud
39,89346	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,04	18,39
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
127,7	140

Alcornoque 273:



Latitud	Longitud
39,89342	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,14	9,42
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
97,5	112,4

Alcornoque 274:



Latitud	Longitud
39,8934	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,78	12,88
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	20,2

Alcornoque 275:



Latitud	Longitud
39,89337	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6	15,72
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
125,1	144,2

Alcornoque 276:



Latitud	Longitud
39,89335	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,81	14,85
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,6
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
112,7	131,7

Alcornoque 277-278:



Latitud	Longitud
39,8933	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,9	11,74
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	10,9

Alcornoque 279-280:



Latitud	Longitud
39,89326	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,7	6,38
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	10,45

Alcornoque 281:



Latitud	Longitud
39,89316	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,07	24,57
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	27,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
135,6	192,7

Alcornoque 282:



Latitud	Longitud
39,89313	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,19	12,25
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	21,45

Alcornoque 283-284-285:



Latitud	Longitud
39,89309	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,28	16,13
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	12,55

Alcornoque 286:



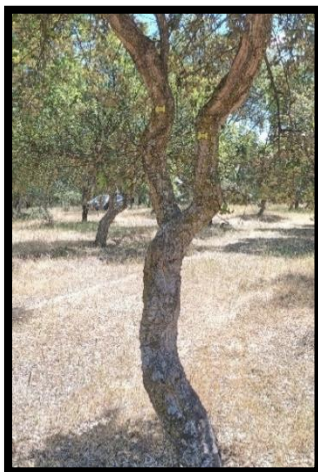
Latitud	Longitud
39,89305	-5,30258
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,67	16,3
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
103,4	136,8

Alcornoque 287:



Latitud	Longitud
39,893	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,56	9,4
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	18,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
58,2	67,7

Alcornoque 288-289:



Latitud	Longitud
39,89299	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,57	8,11
Dendrómetro	DBH (cm)
X	9,5

Alcornoque 290:



Latitud	Longitud
39,89296	-5,30257
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,91	19,83
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	25,9
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
137,7	167,8

Alcornoque 291:



Latitud	Longitud
39,89379	-5,30249
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,14	15,66
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	23,1

Alcornoque 292:



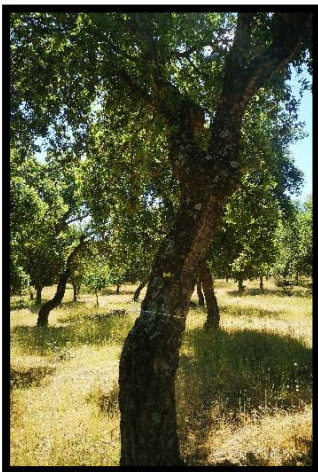
Latitud	Longitud
39,89378	-5,30249
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,46	15,85
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
108,7	130,7

Alcornoque 293:



Latitud	Longitud
39,8937	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,33	11,14
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20,1

Alcornoque 294:



Latitud	Longitud
39,89368	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,21	24,79
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	26,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
149,6	174,6

Alcornoque 296:



Latitud	Longitud
39,89356	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,2	17,04
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20,3

Alcornoque 297:



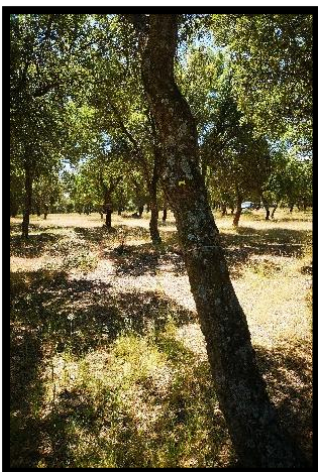
Latitud	Longitud
39,89355	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,19	13,27
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	19,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
62,7	77,3

Alcornoque 298:



Latitud	Longitud
39,89352	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,51	13,33
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	20,7

Alcornoque 299:



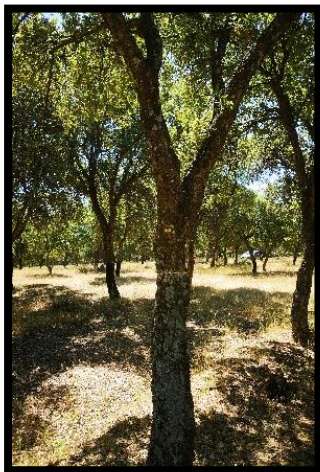
Latitud	Longitud
39,89348	-5,30249
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,33	21,55
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	26,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
165,5	183,2

Alcornoque 300:



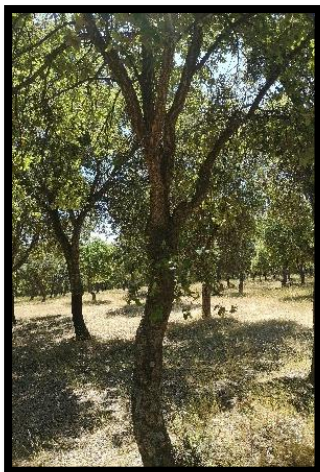
Latitud	Longitud
39,89346	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,35	12,85
Dendrómetro	DBH (cm)
X	19

Alcornoque 301:



Latitud	Longitud
39,89342	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,28	22,77
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
108,4	129,4

Alcornoque 302:



Latitud	Longitud
39,89339	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,82	11,77
Dendrómetro	DBH (cm)
X	19,2

Alcornoque 303:



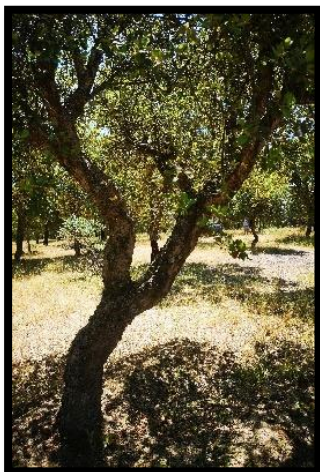
Latitud	Longitud
39,89337	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,39	21
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
89	93,8

Alcornoque 304:



Latitud	Longitud
39,89324	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,17	20,63
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	23,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
100,3	127,7

Alcornoque 305-306:



Latitud	Longitud
39,89319	-5,30251
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,48	23,94
Dendrómetro	DBH (cm)
X	18,9

Alcornoque 307:



Latitud	Longitud
39,89314	-5,3025
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,79	25,93
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	31,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
221,3	283,5

Alcornoque 308:



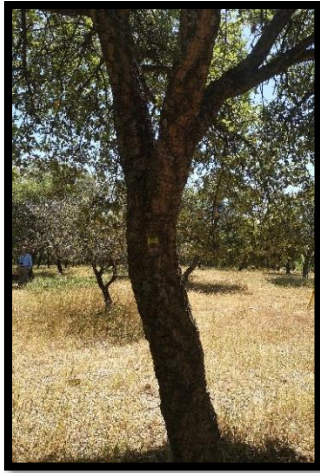
Latitud	Longitud
39,89307	-5,30251
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,72	13,39
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	21,7

Alcornoque 309-310:



Latitud	Longitud
39,89299	-5,30251
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,14	15,84
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	13,4

Alcornoque 311:



Latitud	Longitud
39,89298	-5,30251
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,14	15,15
Dendrómetro	DBH (cm)
X	22,2

Alcornoque 312:



Latitud	Longitud
39,89294	-5,30251
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,55	14,33
Dendrómetro	DBH (cm)
X	17,2

Alcornoque 314:



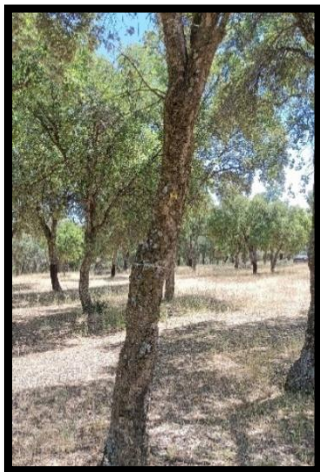
Latitud	Longitud
-5,30243	39,89381
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,33	15,18
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
98,7	120,1

Alcornoque 315:



Latitud	Longitud
-5,30242	39,89378
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,59	15,76
Dendrómetro	DBH (cm)
X	23,6

Alcornoque 317:



Latitud	Longitud
-5,30241	39,89368
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,88	10,29
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	18,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
52,5	67

Alcornoque 319:



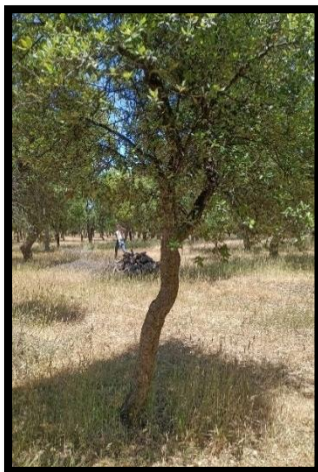
Latitud	Longitud
-5,30243	39,89363
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,32	25,48
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	29
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
172,5	225,1

Alcornoque 320:



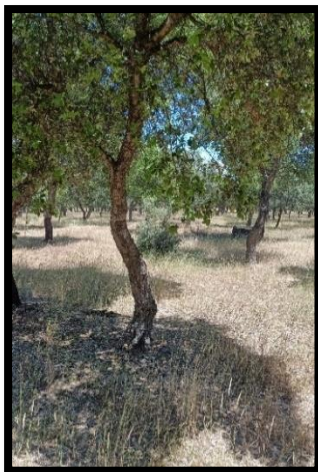
Latitud	Longitud
-5,30244	39,89357
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,51	
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	17,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
50,9	62,7

Alcornoque 322:



Latitud	Longitud
-5,30241	39,89356
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,45	4,96
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	10,8

Alcornoque 323:



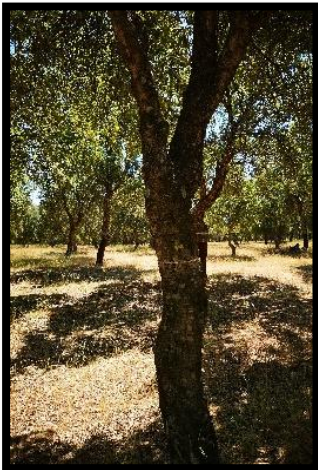
Latitud	Longitud
-5,30243	39,89353
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,8	8,19
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	18,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
63,6	70,3

Alcornoque 324:



Latitud	Longitud
39,89347	-5,30242
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,02	19,61
Dendrómetro	DBH (cm)
X	22,4

Alcornoque 327:



Latitud	Longitud
39,89341	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,28	18,37
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
128,3	142,2

Alcornoque 328:



Latitud	Longitud
39,89337	-5,30242
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,98	30,54
Dendrómetro	DBH (cm)
X	30,4

Alcornoque 329:



Latitud	Longitud
39,89333	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,95	15,84
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	22,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
104,8	120,1

Alcornoque 330:



Latitud	Longitud
39,89324	-5,30242
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,9	20,6
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
106,3	137,5

Alcornoque 331:



Latitud	Longitud
39,89322	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,82	6,99
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	14,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
32,6	36,7

Alcornoque 333:



Latitud	Longitud
39,89314	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,45	18,54
Dendrómetro	DBH (cm)
X	27,5

Alcornoque 334:



Latitud	Longitud
39,89308	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,27	6,74
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	12,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
25,6	25

Alcornoque 337:



Latitud	Longitud
39,89302	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,9	23,81
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
78,9	89,9

Alcornoque 338:



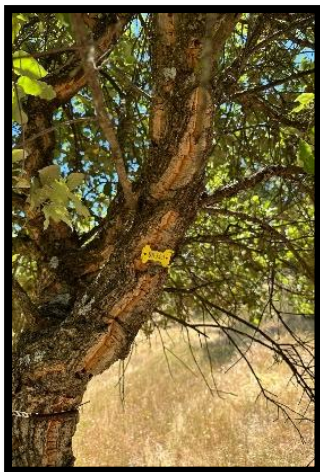
Latitud	Longitud
39,89301	-5,30243
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,97	20,32
Dendrómetro	DBH (cm)
X	24,5

Alcornoque 340:



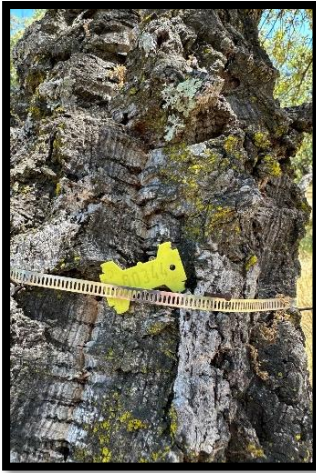
Latitud	Longitud
-5,30236	39,89382
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,36	19,24
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	26,6
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
124,7	179,2

Alcornoque 343:



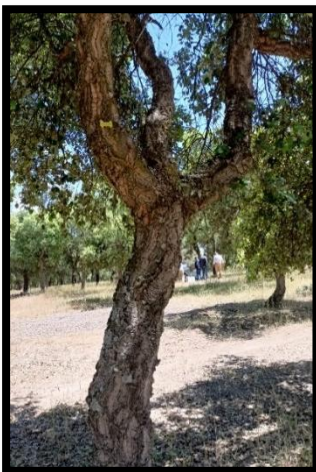
Latitud	Longitud
-5,30236	39,89374
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,57	6,63
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	12,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
23,9	24,2

Alcornoque 344:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89364
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,83	23,82
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	30,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
180,7	254,3

Alcornoque 346:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89357
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,37	12,18
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	24,3

Alcornoque 348:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89348
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,54	17,37
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	21,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
93,6	102,3

Alcornoque 349:



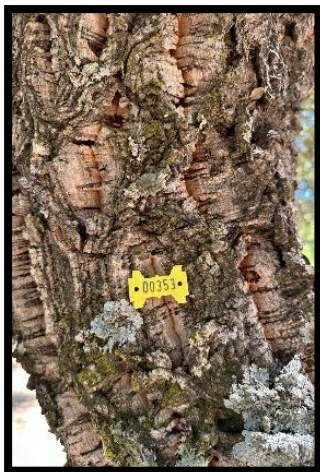
Latitud	Longitud
-5,30236	39,89345
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,92	12,53
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20,8

Alcornoque 352:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89341
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,24	15,09
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	21,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
86,6	102,5

Alcornoque 353:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89336
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,48	29,98
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	31,1
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
203,3	270,4

Alcornoque 354:



Latitud	Longitud
-5,30235	39,89329
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,91	18,46
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	25,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
135	159,7

Alcornoque 356:



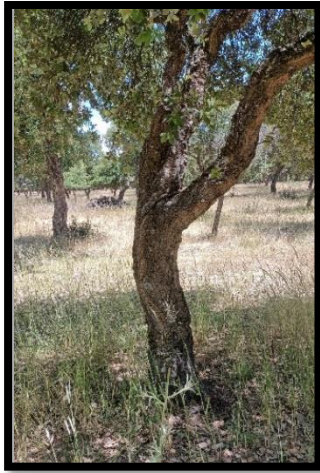
Latitud	Longitud
-5,30235	39,89323
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,92	11,99
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
74,1	90,8

Alcornoque 359:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89318
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,5	15,56
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	21,9
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
83,6	108,1

Alcornoque 360:



Latitud	Longitud
-5,30235	39,89315
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,26	11,26
Dendrómetro	DBH (cm)
X	26,5

Alcornoque 361:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89313
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,29	13,27
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	18,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
53,3	68,5

Alcornoque 363:



Latitud	Longitud
-5,30236	39,89305
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,11	23,26
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	29,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
184,5	241,9

Alcornoque 365:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,8938
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,55	23,94
Dendrómetro	DBH (cm)
X	29,4

Alcornoque 366:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,89378
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,63	14,84
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,2
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
77,7	87,5

Alcornoque 368:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,89373
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,24	17,54
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	24,6
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
119,5	146,7

Alcornoque 370:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,89357
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,09	31,79
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	25,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
116,7	166,2

Alcornoque 371:



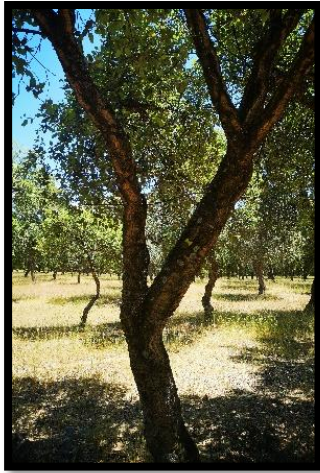
Latitud	Longitud
-5,30229	39,89349
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,67	28,23
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	26,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
158	181,5

Alcornoque 372:



Latitud	Longitud
-5,3023	39,89346
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,24	6,94
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,8
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
84,7	94,5

Alcornoque 374:



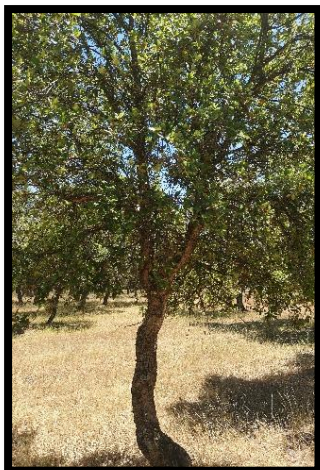
Latitud	Longitud
-5,3023	39,89341
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,16	21,57
Dendrómetro	DBH (cm)
X	27,8

Alcornoque 375:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,89336
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,21	18,65
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	27,4
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
162,6	193

Alcornoque 376:



Latitud	Longitud
-5,30228	39,8933
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,19	6,44
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	13,5
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
30,1	31,3

Alcornoque 379:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,89325
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,01	21,04
Dendrómetro	DBH (cm)
X	25,3

Alcornoque 381:



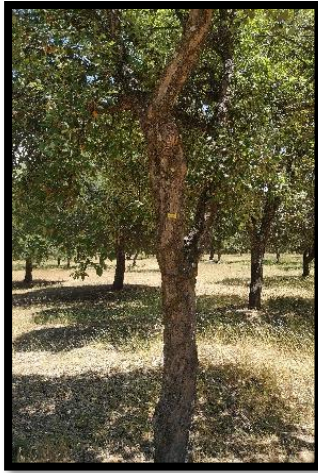
Latitud	Longitud
-5,30229	39,8932
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,21	25,13
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	31,9
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
210,7	286,9

Alcornoque 383:



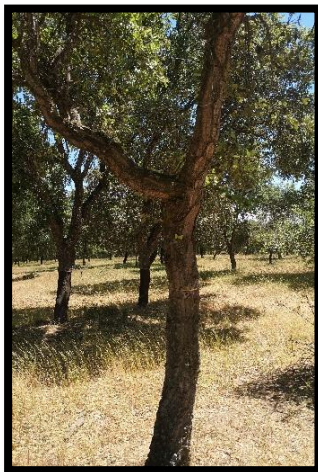
Latitud	Longitud
-5,30229	39,89317
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,51	5,43
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	11,1
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
20,2	18,8

Alcornoque 385:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,8931
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,86	18,43
Dendrómetro	DBH (cm)
X	19,1

Alcornoque 386:



Latitud	Longitud
-5,30229	39,89307
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,26	17,12
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	20,3
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
64,9	88,6

Alcornoque 388:



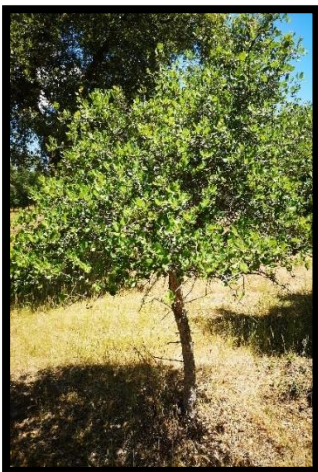
Latitud	Longitud
-5,3023	39,893
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
4,86	19,87
Dendrómetro	DBH (cm)
X	17,35

Alcornoque 389:



Latitud	Longitud
-5,3023	39,89295
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,28	31,29
Dendrómetro	DBH (cm)
✓	30,7
Biomasa por fórmula general (kg)	Biomasa por fórmula alométrica (kg)
178,2	261,1

Alcornoque 391:



Latitud	Longitud
-5,30222	39,89381
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,11	5,97
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	7,34

Alcornoque 392:



Latitud	Longitud
-5,30224	39,89375
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
4,71	5,01
Dendrómetro	DBH (cm)
✗	8,53

Alcornoque 394:



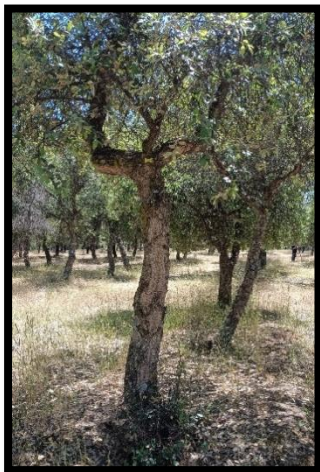
Latitud	Longitud
-5,30222	39,89362
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,79	14,32
Dendrómetro	DBH (cm)
X	14,9

Alcornoque 395:



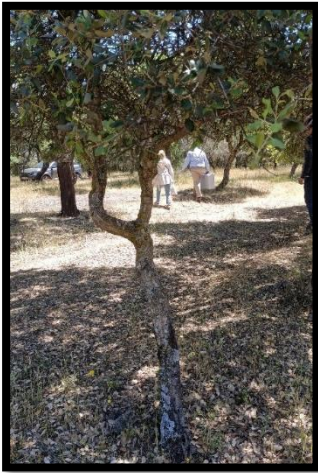
Latitud	Longitud
-5,30221	39,89359
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,546936	27,95
Dendrómetro	DBH (cm)
X	29,25

Alcornoque 396:



Latitud	Longitud
-5,30221	39,89352
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,086792	9,15
Dendrómetro	DBH (cm)
X	12

Alcornoque 397:



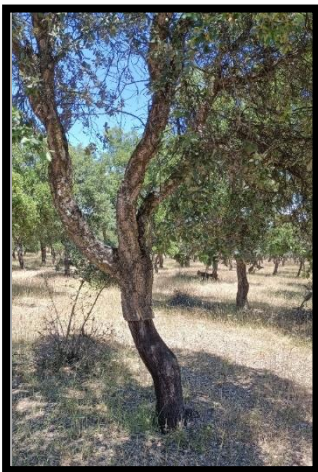
Latitud	Longitud
-5,30221	39,89346
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,669403	10,22
Dendrómetro	DBH (cm)
X	13,1

Alcornoque 398:



Latitud	Longitud
-5,30222	39,89342
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,15	27,69
Dendrómetro	DBH (cm)
X	27,83

Alcornoque 399:



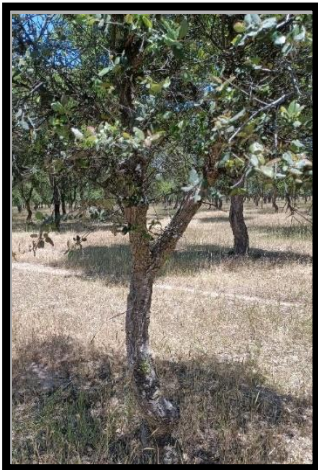
Latitud	Longitud
-5,30223	39,89339
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,242889	9,69
Dendrómetro	DBH (cm)
X	14,1

Alcornoque 400:



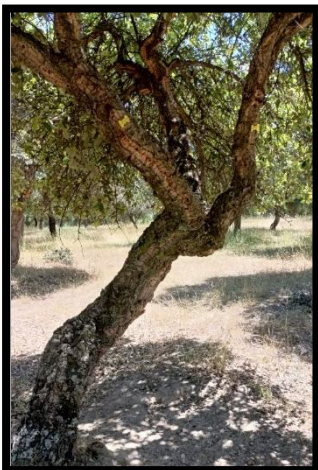
Latitud	Longitud
-5,30223	39,89336
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,161896	18,07
Dendrómetro	DBH (cm)
X	23,05

Alcornoque 401:



Latitud	Longitud
-5,30223	39,89331
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
5,214844	8,2
Dendrómetro	DBH (cm)
X	16,55

Alcornoque 402-403:



Latitud	Longitud
-5,30223	39,89321
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,188293	22,03
Dendrómetro	DBH (cm)
X	22,1

Alcornoque 404:



Latitud	Longitud
-5,30222	39,89308
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
6,13	19,97
Dendrómetro	DBH (cm)
X	20

Alcornoque 405:



Latitud	Longitud
-5,30222	39,89305
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,00647	22,25
Dendrómetro	DBH (cm)
X	28,75

Alcornoque 406:



Latitud	Longitud
-5,30224	39,89302
Altura (m)	Superficie de la copa (m ²)
7,213531	27,37
Dendrómetro	DBH (cm)
X	25,4

ANEJO 2

PLANOS

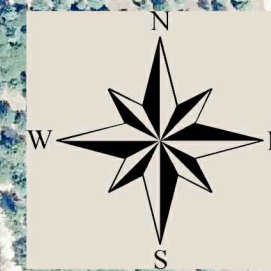
Planos realizados a lo largo de la elaboración del proyecto:

1. Plano de localización de la zona de estudio sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).
2. Inventario de árboles realizado sobre ortografía obtenida de UAV (vehículo aéreo no tripulado).
3. Máscaras creadas manualmente sobre ortografía obtenida de UAV (vehículo aéreo no tripulado).
4. Alturas asociadas a las máscaras creadas sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).
5. Superficie de las copas de los alcornoques asociadas a las máscaras sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).
6. Diámetros asociados a las máscaras creadas sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).
7. NDVI sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).
8. NDRE sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).
9. GNDVI sobre Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA).

5°18'10"W

5°17'58"W

5°17'46"W



Autovía del Suroeste/ Pº. de Extremadura

A-5



Calzada de Oropesa

39°53'38"N

39°53'38"N

Zona de estudio

39°53'26"N

39°53'26"N



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

5°18'10"W

5°17'58"W

5°17'46"W

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

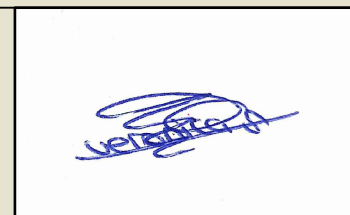
MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

TITULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.

PLANO: Plano de localización de la zona de estudio sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)

ESCALA:
1:25.000

LA ALUMNA:
VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ



Nº: 01
FEBRERO 2025

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

39°53'38"N

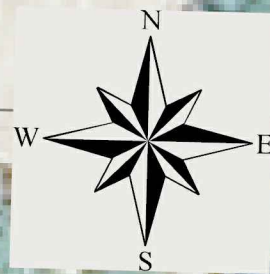
39°53'38"N

39°53'36"N

39°53'36"N

39°53'35"N

39°53'35"N



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

TÍTULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.

PLANO: Inventario de árboles realizado sobre ortografía obtenida de UAV (vehículo aéreo no tripulado)

ESCALA:

LA ALUMNA:

1:10.000

VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ



Nº: 02

FEBRERO 2025

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

39°53'38"N

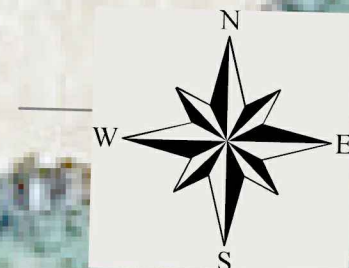
39°53'38"N

39°53'36"N

39°53'36"N

39°53'35"N

39°53'35"N



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

MÁSTER EN INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TÍTULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.

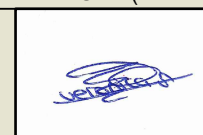
PLANO:
Máscaras creadas manualmente sobre ortografía obtenida de UAV (vehículo aéreo no tripulado)

ESCALA:

LA ALUMNA:

1:10.000

VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ



Nº: 03

FEBRERO 2025

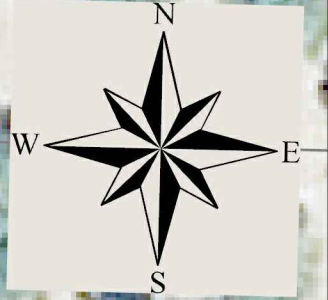
5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

39°53'38"N

39°53'38"N



39°53'36"N

39°53'36"N

39°53'35"N

39°53'35"N

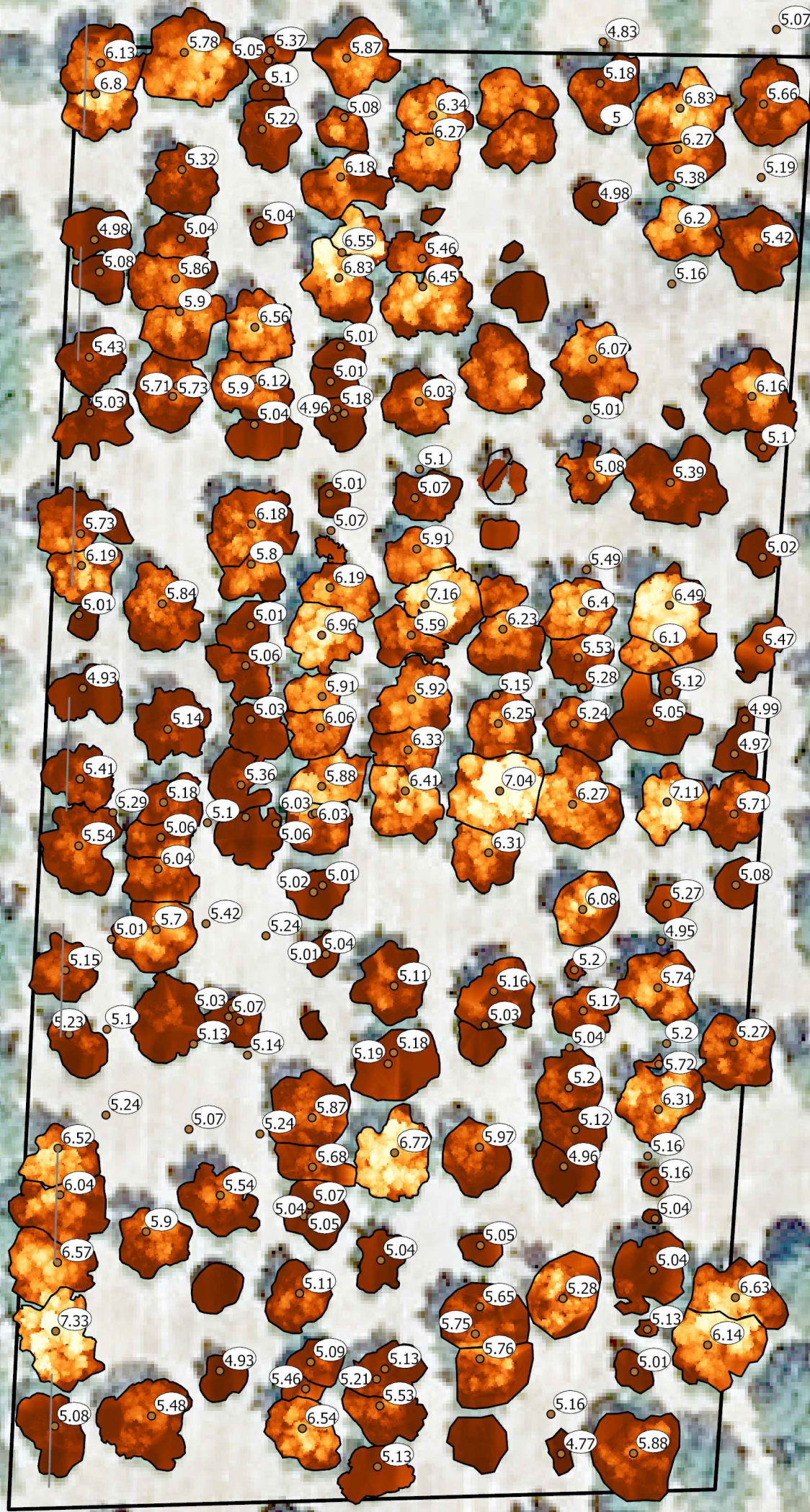
39°53'33"N

5°18'10"W

39°53'33"N

5°18'9"W

5°18'7"W



- Árboles
- Altura (MDS-MDT)
- Valores (metros)
- 7,78601
- 4,71109
- ZONA ESTUDIO
- Delimitación copas



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID	
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS	
MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA	
TÍTULO:	Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.
PLANO:	Alturas asociadas a las máscaras creadas sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)
ESCALA:	LA ALUMNA:
1:10.000	VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ
	Nº: 04
	FEBRERO 2025



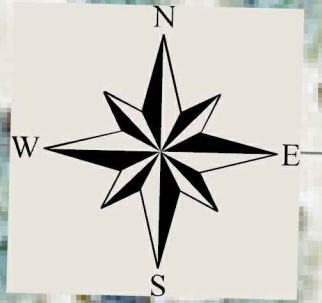
5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

39°53'38"N

39°53'38"N



39°53'36"N

39°53'36"N

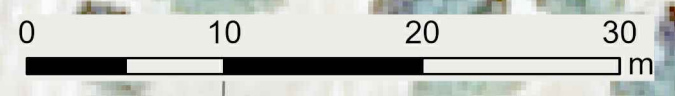
39°53'35"N

39°53'35"N

39°53'33"N



- Superficie copa (m2)
- ZONA ESTUDIO
- Delimitación copas



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS	
MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA	
TÍTULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.	
PLANO: Superficies de las copas asociadas a las máscaras sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)	
ESCALA: 1:10.000	LA ALUMNA: VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ
Nº: 05	
FEBRERO 2025	

5°18'10"W

39°53'33"N

5°18'9"W

5°18'7"W

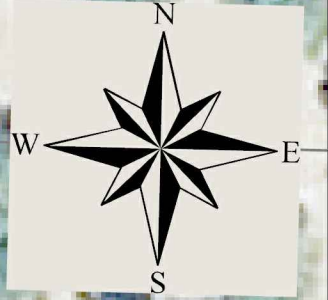
5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

39°53'38"N

39°53'38"N



39°53'36"N

39°53'36"N

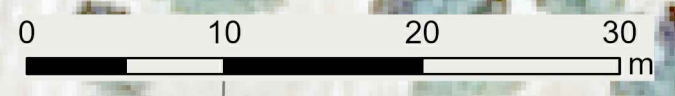
39°53'35"N

39°53'35"N

39°53'33"N



- Diámetro de copa (cm)
- ZONA ESTUDIO
- Delimitación copas



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

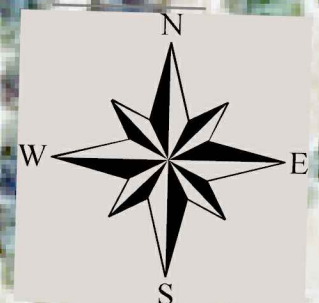
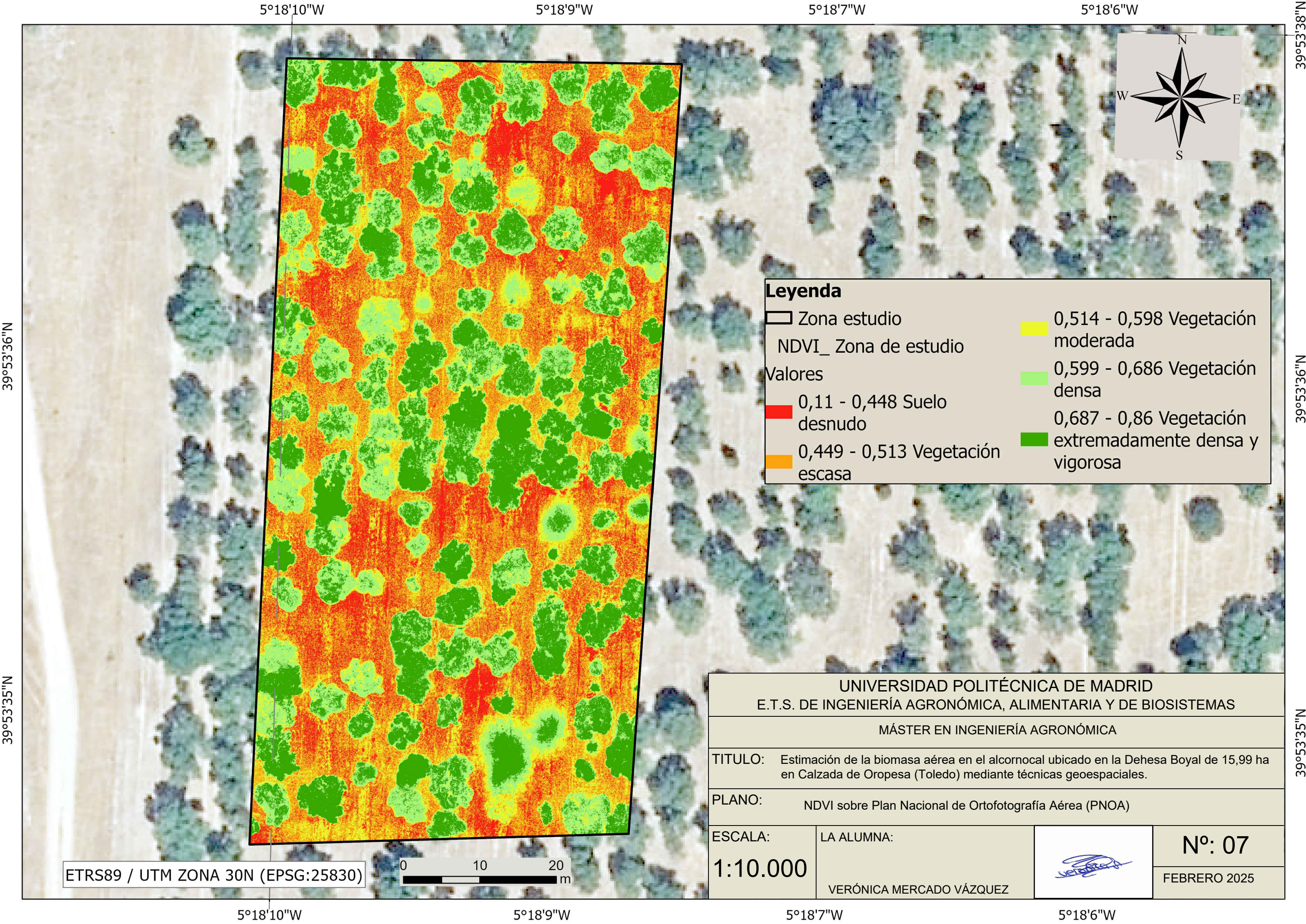
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID			
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRÓNOMA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS			
MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA			
TÍTULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.			
PLANO: Diámetros asociados a las máscaras creadas sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)			
ESCALA:	LA ALUMNA:		Nº: 06
1:10.000	VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ		FEBRERO 2025

5°18'10"W

39°53'33"N

5°18'9"W

5°18'7"W

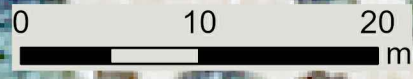


Leyenda

Zona estudio	0,514 - 0,598 Vegetación moderada
NDVI_ Zona de estudio	0,599 - 0,686 Vegetación densa
0,11 - 0,448 Suelo desnudo	0,687 - 0,86 Vegetación extremadamente densa y vigorosa
0,449 - 0,513 Vegetación escasa	

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS			
MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA			
TITULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.			
PLANO: NDVI sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)			
ESCALA: 1:10.000	LA ALUMNA: VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ		Nº: 07 FEBRERO 2025

ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)



39°53'36"N

39°53'35"N

39°53'36"N

39°53'35"N

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

5°18'6"W

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

5°18'6"W

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

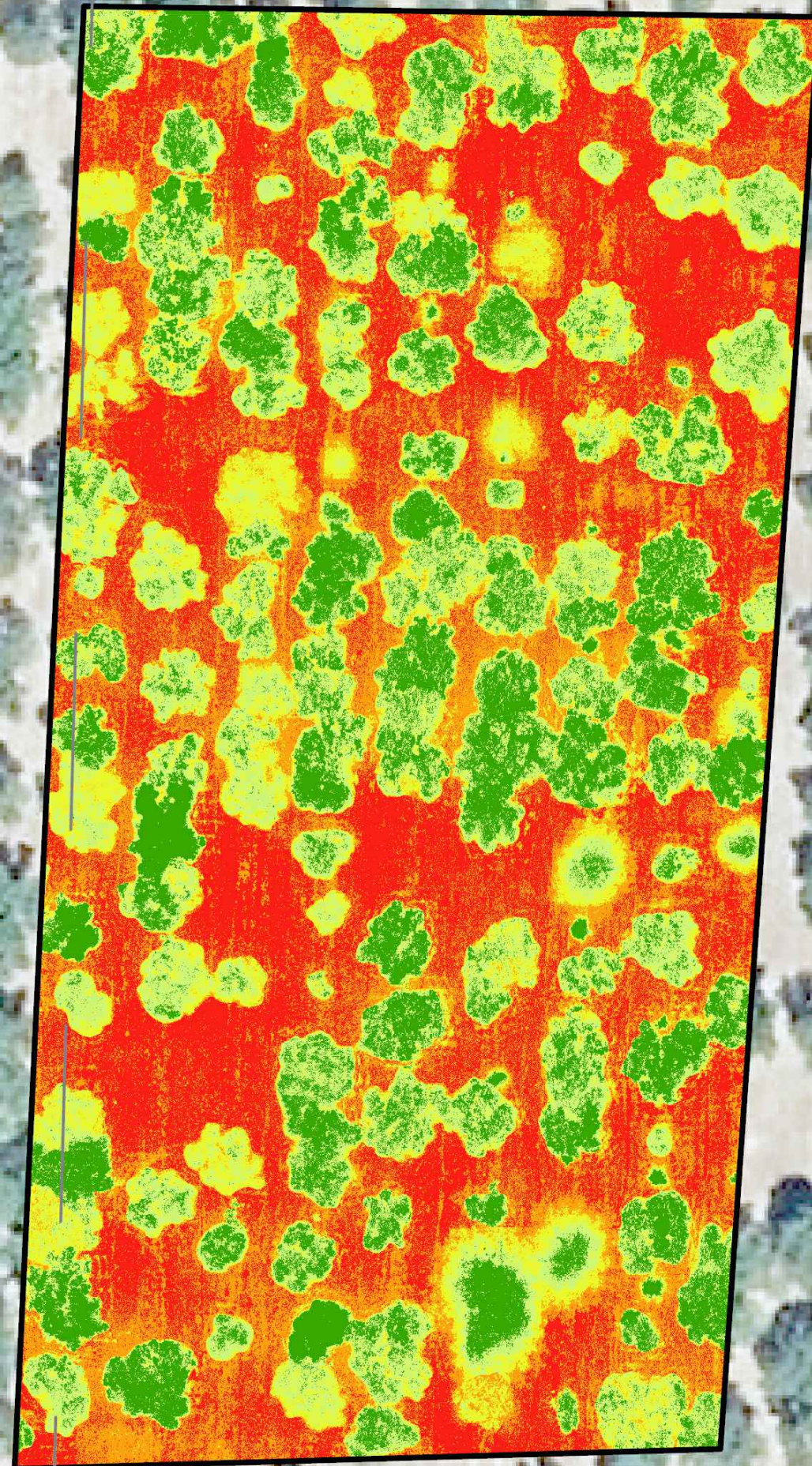
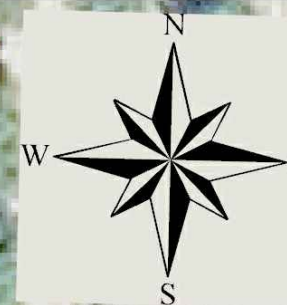
5°18'6"W

39°53'36"N

39°53'35"N

39°53'36"N

39°53'35"N



Leyenda

Zona estudio

NDRE_Zona de estudio

Valores

-0,082 - 0,183 Sin vegetación

0,184 - 0,253 Baja densidad vegetal

0,254 - 0,335 Cobertura vegetal media

0,336 - 0,402 Alta densidad vegetal

0,403 - 0,597 Vegetación muy densa

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

TITULO: Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.

PLANO: NDRE sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)

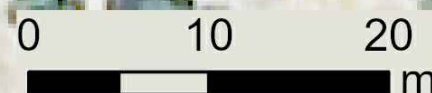
ESCALA:
1:10.000

LA ALUMNA:
VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ

Nº: 08

FEBRERO 2025

ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)



5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

5°18'6"W

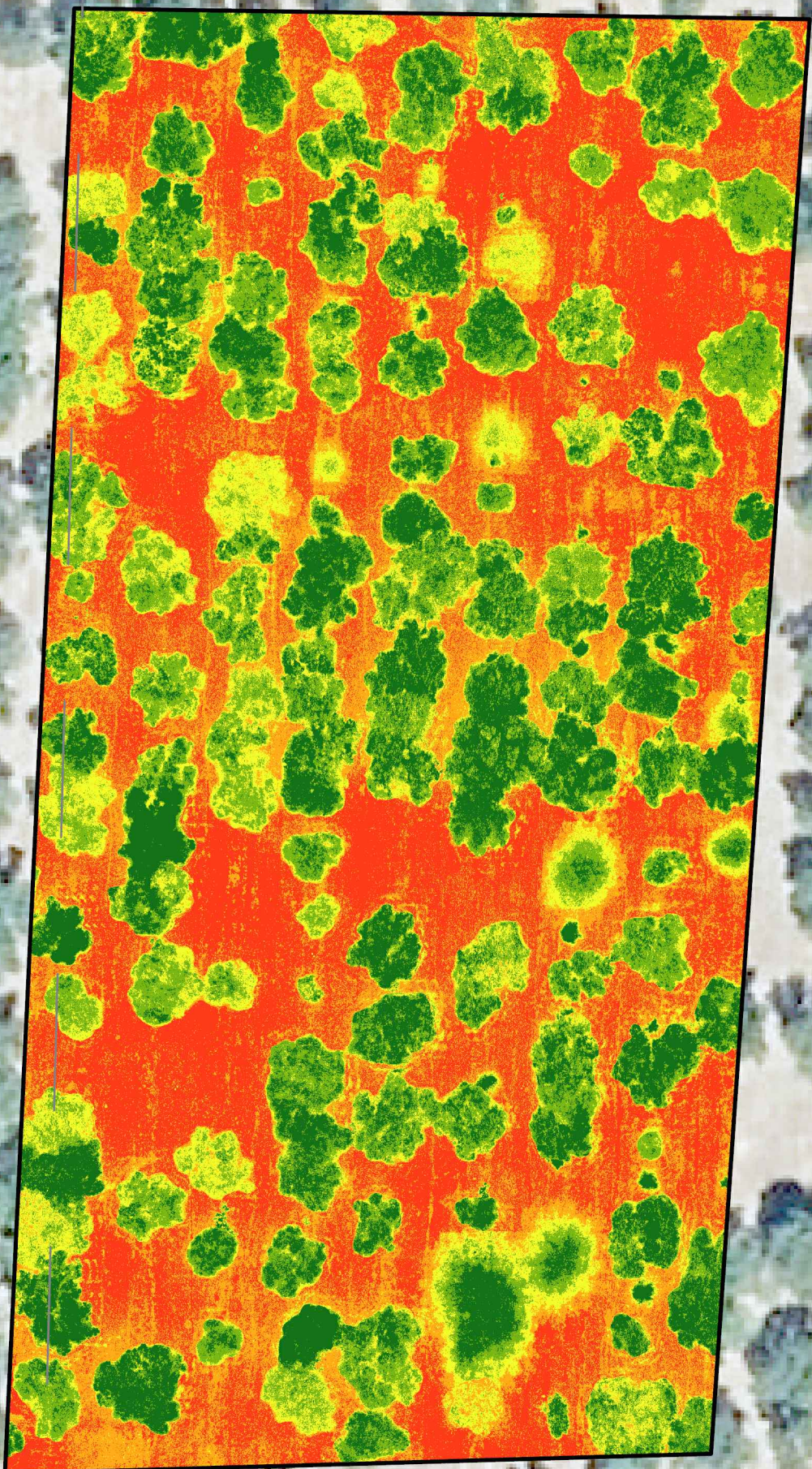
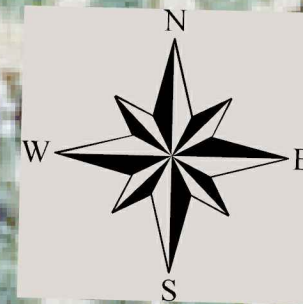
5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

5°18'6"W

39°53'38"N



Leyenda

GNDVI_ Zona de estudio	-0,254 - -0,186
Valores	Presencia de estrés hídrico moderado
-0,596 - -0,405	-0,185 - 0,083
Vegetación muy saludable	Presencia de estrés hídrico
-0,404 - -0,338	Zona estudio
Vegetación saludable	
-0,337 - -0,255	
Vegetación saludable con leves signos de estrés	

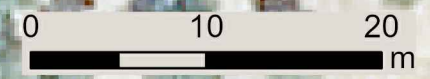
39°53'36"N

39°53'36"N

39°53'35"N

39°53'35"N

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID			
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS			
MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA			
TITULO:	Estimación de la biomasa aérea en el alcornocal ubicado en la Dehesa Boyal de 15,99 ha en Calzada de Oropesa (Toledo) mediante técnicas geoespaciales.		
PLANO:	GNDVI sobre Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)		
ESCALA:	LA ALUMNA:		Nº: 09
1:10.000	VERÓNICA MERCADO VÁZQUEZ		FEBRERO 2025



ETRS89 / UTM ZONA 30N (EPSG:25830)

5°18'10"W

5°18'9"W

5°18'7"W

5°18'6"W

5°18'4"W

5°18'4"W