

Evaluación de la dinámica de la biomasa del sabinar en Doñana mediante LiDAR multiescala

Estudio de la dinámica de la biomasa y el vigor foliar del sabinar en el Parque Nacional de Doñana mediante LiDAR multitemporal

| Autora: Guadalupe Etcheverry

| Tutor académico: Luis Ángel Ruiz Fernández

| Tutor experimental: Ricardo Díaz-Delgado Hernández

I- INTRODUCCIÓN

El sabinar costero de Doñana, (*Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata*, Hábitat 2250*) constituye uno de los ecosistemas más singulares y amenazados de la Península Ibérica. Este ha experimentado un proceso documentado de decaimiento entre 2011 y la actualidad (mortalidad, pérdida de cobertura y defoliación) atribuido a sequías extremas y variaciones freáticas.

La teledetección LiDAR-dron permite evaluar la dinámica de la biomasa a escala de individuo e identificar procesos de deterioro foliar interno abriendo la posibilidad de separar lo que crece de lo que se deteriora.

II- OBJETIVOS

General:

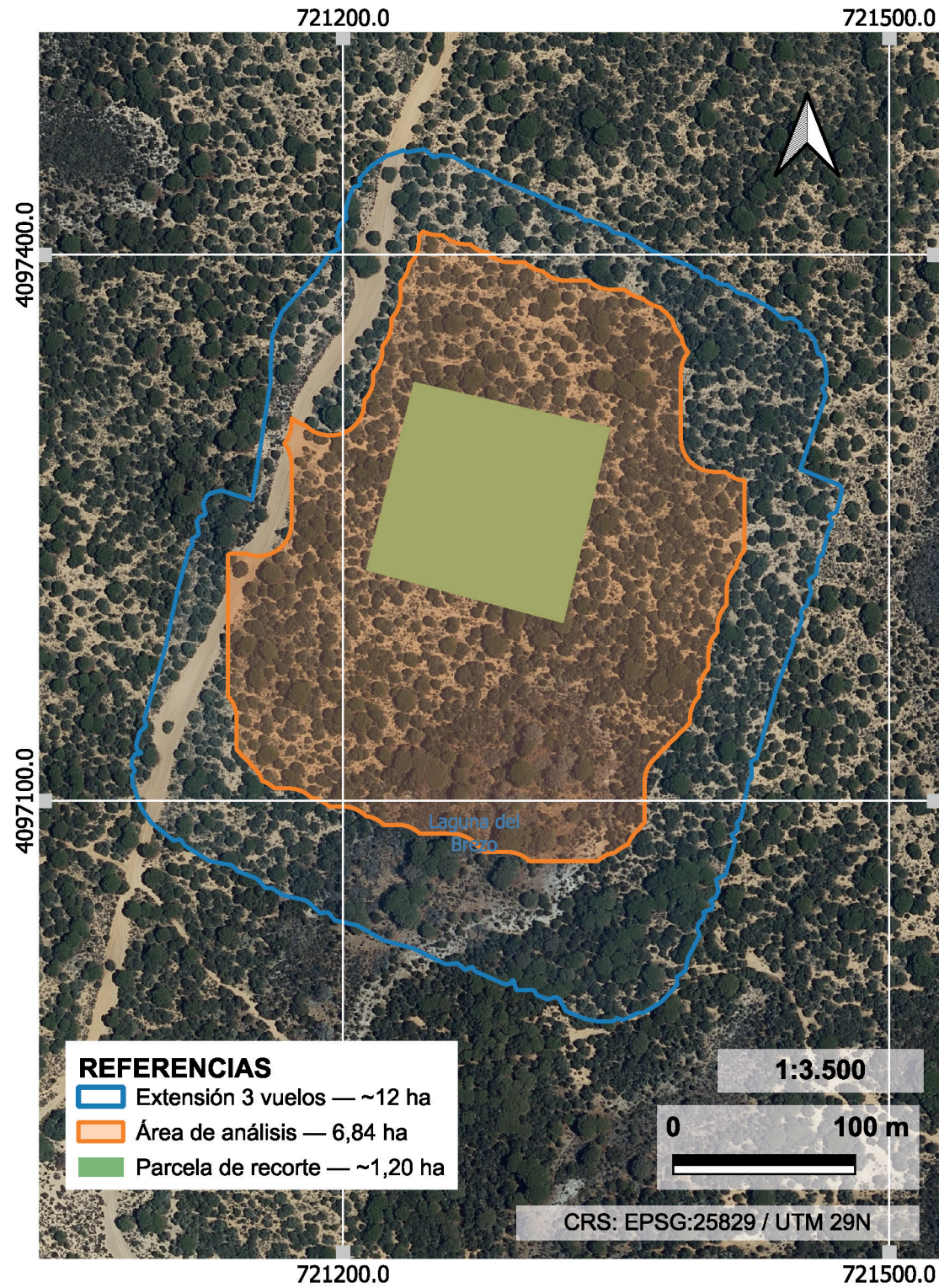
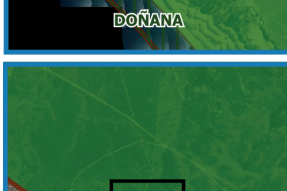
Desarrollar y validar un pipeline LiDAR-dron para la estimación de la biomasa aérea e indicadores de vigor foliar en el sabinar de Doñana, analizando su dinámica temporal (2022–2025).

Objetivos Específicos:

- Validar la segmentación individual de árboles (ITS) frente a una referencia de alta densidad (MLS+dron)
- Estimar la biomasa individual mediante modelos alométricos y detectar pérdidas o ganancias estructurales en la serie temporal.
- Contrastar el vigor foliar LiDAR (FRS y LAI_e) frente a índices multispectrales (NDVI, Red Edge, NIR).
- Cuantificar la precisión de segmentación (IoU) y evaluar los sesgos causados por las diferencias geométricas entre sensores.

III- ÁREA DE ESTUDIO

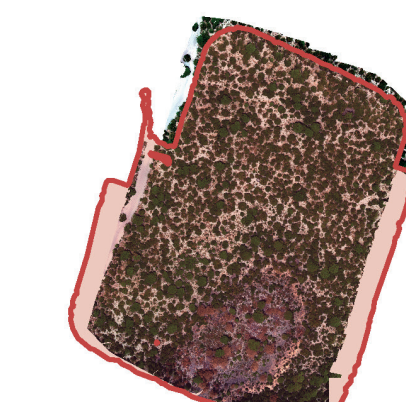
El sabinar del Paraje de Ojillo, en el término municipal de Almonte (Huelva), dentro del ámbito del Parque Natural de Doñana.



Extensión de las nubes



LiDAR-dron 2022 - 8,23 ha



LiDAR-dron 2024 - 12,01 ha



LiDAR-dron 2025 - 12,48 ha

IV- DATOS Y METODOLOGÍA

Fuente	Extensión	Plataforma	Densidad	% suelo	Uso
MERGE (MLS + dron 2024)	1,18 ha	Leica BLK2GO + DJI Zenmuse L1	~2.400 pts/m²	—	Verdad terreno para validación
LiDAR dron 2022	8,23 ha	DJI Zenmuse L1	662 pts/m²	45,68%	Análisis temporal
LiDAR dron 2024	12,01 ha	DJI Zenmuse L1	997 pts/m²	46,88%	Referencia / Análisis temporal
LiDAR dron 2025	12,48 ha	DJI Zenmuse L1	93 pts/m²	19,38%	Análisis temporal

I - ENTRADA

Nube de puntos LiDAR bruta (.las / .laz)

II - PROCESADO

Clasificación de suelo con CSF → MDT a 0,5 m
Normalización: Z pasa a ser altura sobre el suelo
Máscara de Pinos y retirada de artefactos
Homogeneización a 100 pts/m², sobre los retornos de vegetación
guale 2022 y 2024 a la densidad nativa de 2025

III - SEGMENTACIÓN

Algoritmo Li2012

dt1 = 1,5 m | dt2 = 1,5 m | R = 2 | mín 10 puntos por segmento
Semillas CHM suavizado para copas sin máximo propio
División por DBSCAN (eps = 0,8 m) de copas fusionadas
Polígonos de copa por casco cóncavo (concavity = 2,0)
(parámetros idénticos en las tres campañas)

IV - MÉTRICAS Y VIGOR FOLIAR

Geometría por individuo: zmax | h_pond | area_2d | V_{3D} (volumen del casco convexo 3D)
FRS = ntz > (zmax + 1,5) / 2 | ntz > 1,5 → indicador estructural de vigor, en las tres campañas
LAI_e = -ln(P_gap) / G, con G = 0,5 (ley de Beer-Lambert)
solo estimable en las nubes originales de 2022 y 2024

V - BIOMASA Y CARBONO

Madera = 559,7 · V_{3D}^{0,11} / 1000
Hoja = 183,1 · V_{3D}^{0,11} / 1000
Estado fitosanitario por percentiles del FRS → Factor_E
Sano 1,00 | Estresado 0,80 | Decaído 0,55 | Decaído severo 0,40
Biomasa_Final = (Madera + Hoja) · Factor_E
Carbono = Biomasa · 0,47 → t/ha sobre la zona útil común (6,84 ha)

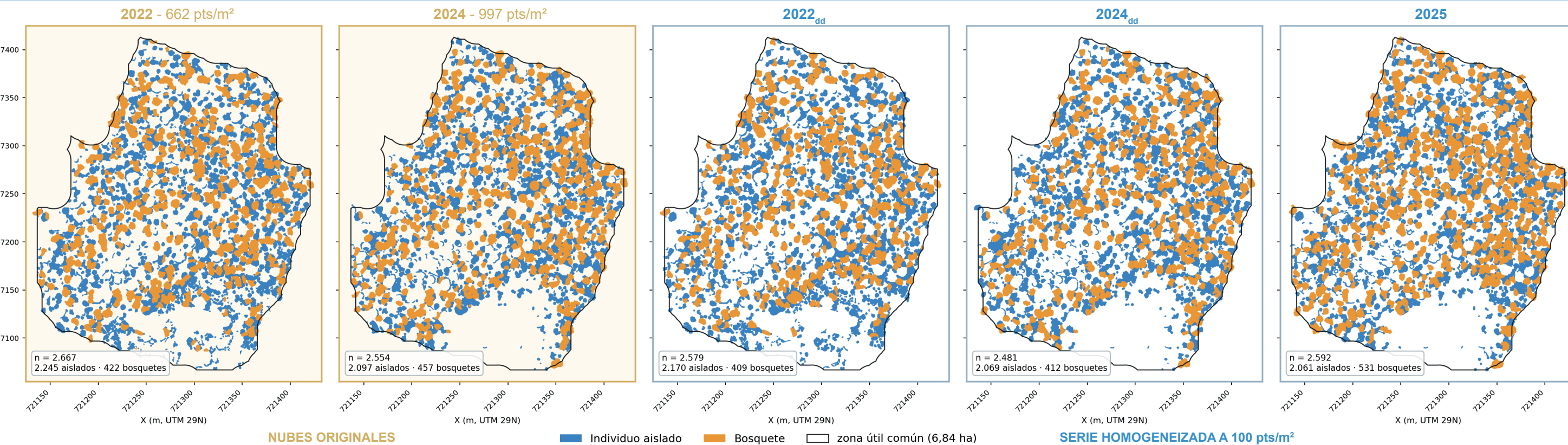
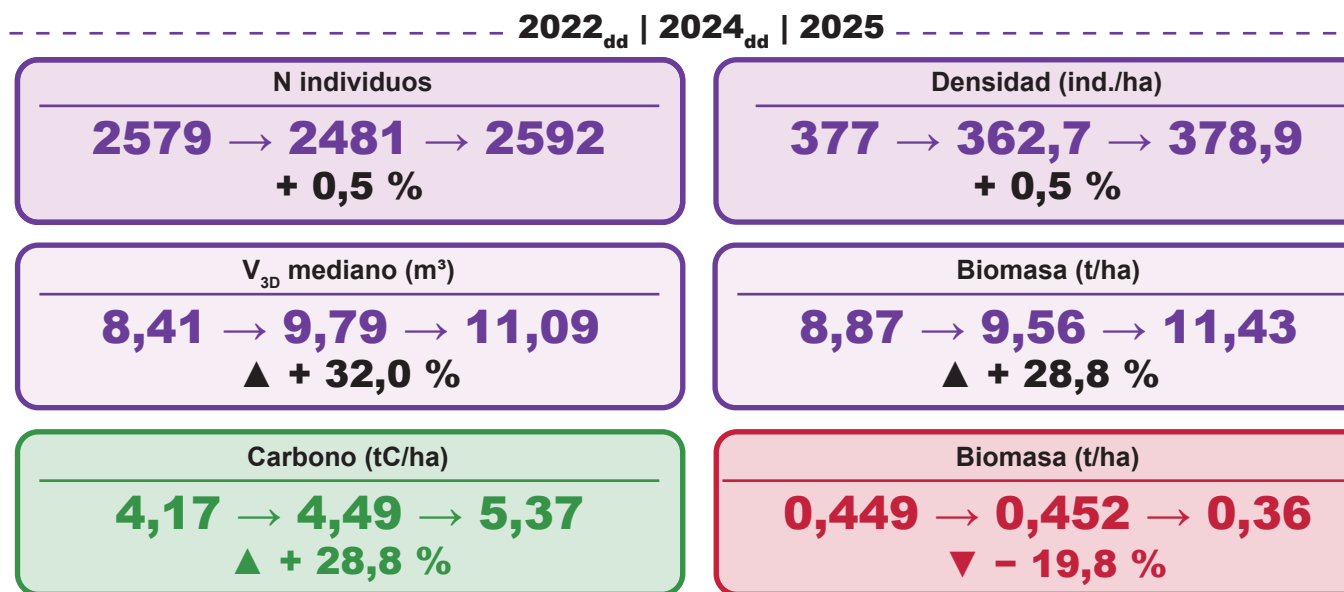
VI - SALIDA

CSV de resultados: Métricas | Biomasa | Carbono | FRS | Tipo | Estado fitosanitario | Separador ";", decimal "."
GPKG apices: Puntos con las métricas y la clasificación asociada EPSG:25829
GPKG copas: Polígonos de copa con la biomasa asociada | Base especial del LAI_e
LAS segmentado: treeID como atributo y en PointSourceID | Cloud Compare / QGIS

V - RESULTADOS

Validación y segmentación

Recall laxo (IoU ≥ 0,25): 96,4% en MERGE frente a 89,3 % en el vuelo de dron (~7,1 pp, aporte neto del escaneo terrestre) | IoU mediano 0,633 vs 0,524 | Sobresegmentación idéntica (56,0%), inherente a Li2012



Existencias y dinámica

La población permanece estable (+0,5%) mientras la biomasa aérea seca crece un 28,8% y el stock de carbono pasa de 4,17 a 5,37 tC/ha sobre las 6,84 ha de la zona útil común.

El incremento no se reparte por igual. Los individuos aislados mantienen su biomasa (3,72 → 3,80 t/ha) pese a descender en número (2170 → 2061), mientras que la de los bosquetes crece un 47,8% (5,16 → 7,63 t/ha), impulsada por el salto de 409 a 531 segmentos.

El ratio V_{3D}/Zmax descarta una expansión real de las copas: dentro de cada tipología sube un 12% y un 10%, frente al 27,5 % del conjunto. El crecimiento agregado es, en buena parte, un efecto de composición por fusión de copas contiguas.

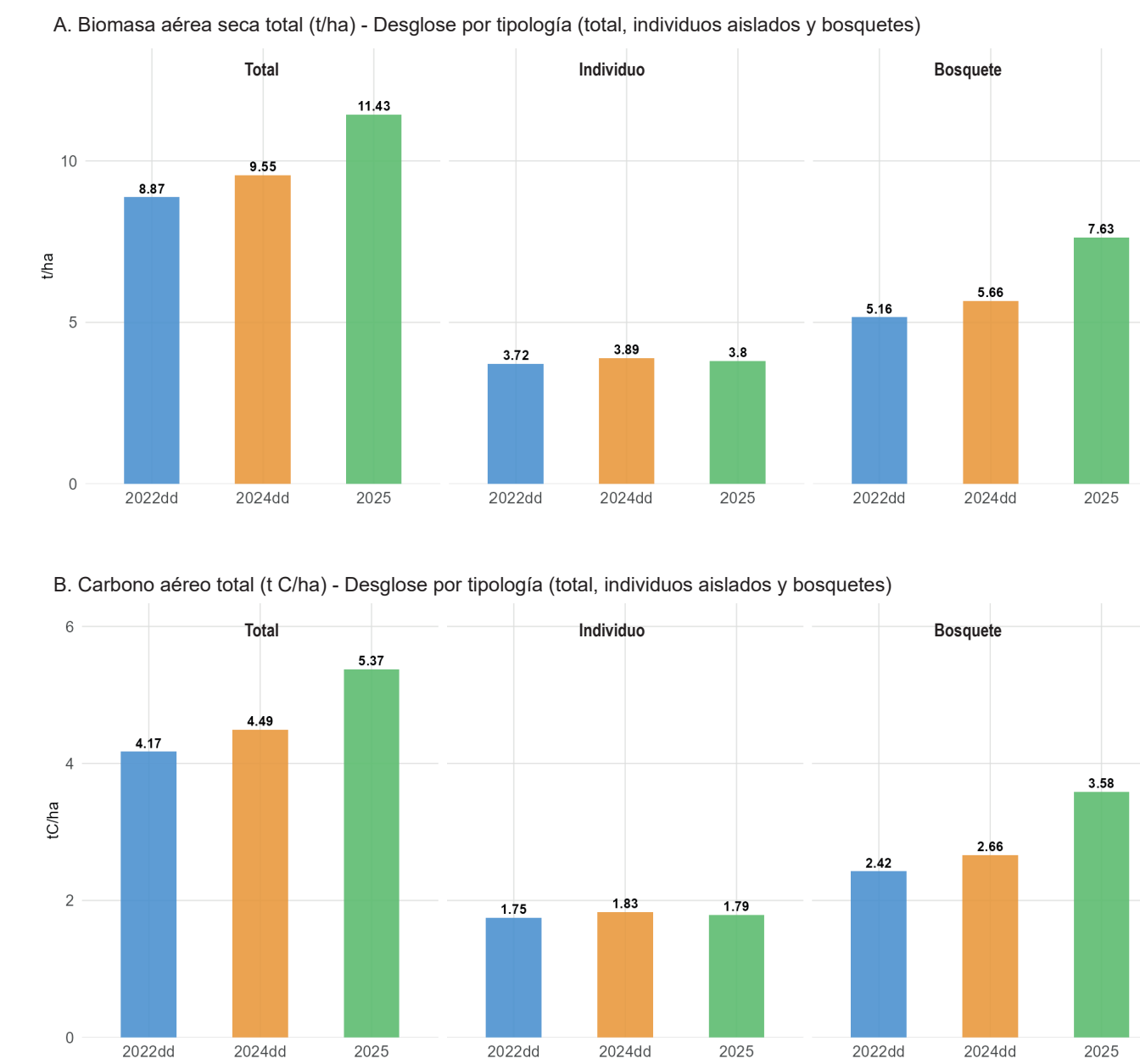


Figura 1. Evolución la de biomasa aérea seca y carbono aéreo desglasado por tipología de segmento en las tres campañas homogeneizadas.

Desacoplamiento estructura / follaje

La envolvente geométrica y el follaje interior divergen. El volumen mediano de copa crece un 32,0% (8,41 → 11,09 m³) y la altura apenas se mueve (Zmax 3,55 → 3,70 m), mientras el vigor foliar retrocede un 19,8% (FRS 0,449 → 0,360). La copa ocupa cada vez más espacio con cada vez menos hoja dentro.

El emparejamiento de pies sitúa la señal en el tiempo. Entre 2022 y 2024 desciende el 51,2% de los individuos, proporción indistinguible del azar (p = 0,115); entre 2024 y 2025 lo hace el 77,1% (p = 4 × 10⁻¹²⁸).

El deterioro no es progresivo, sino que se concentra en el último intervalo ya que la caída persiste en cinco de las seis clases de altura y se acentúa con el tamaño, hasta un 34% en los ejemplares de más de 6 m. No responde, por tanto, a un cambio de composición por tamaños, y el gradiente con el porte es coherente con la fisiología de la especie.

El contraste con los nulos metodológicos descarta que la señal sea un artefacto: al desdensificar una misma nube el FRS sube levemente (mediana +0,009 en 2022 y +0,014 en 2024), de modo que el procedimiento actúa en contra del resultado y la magnitud del deterioro estimada es conservadora.

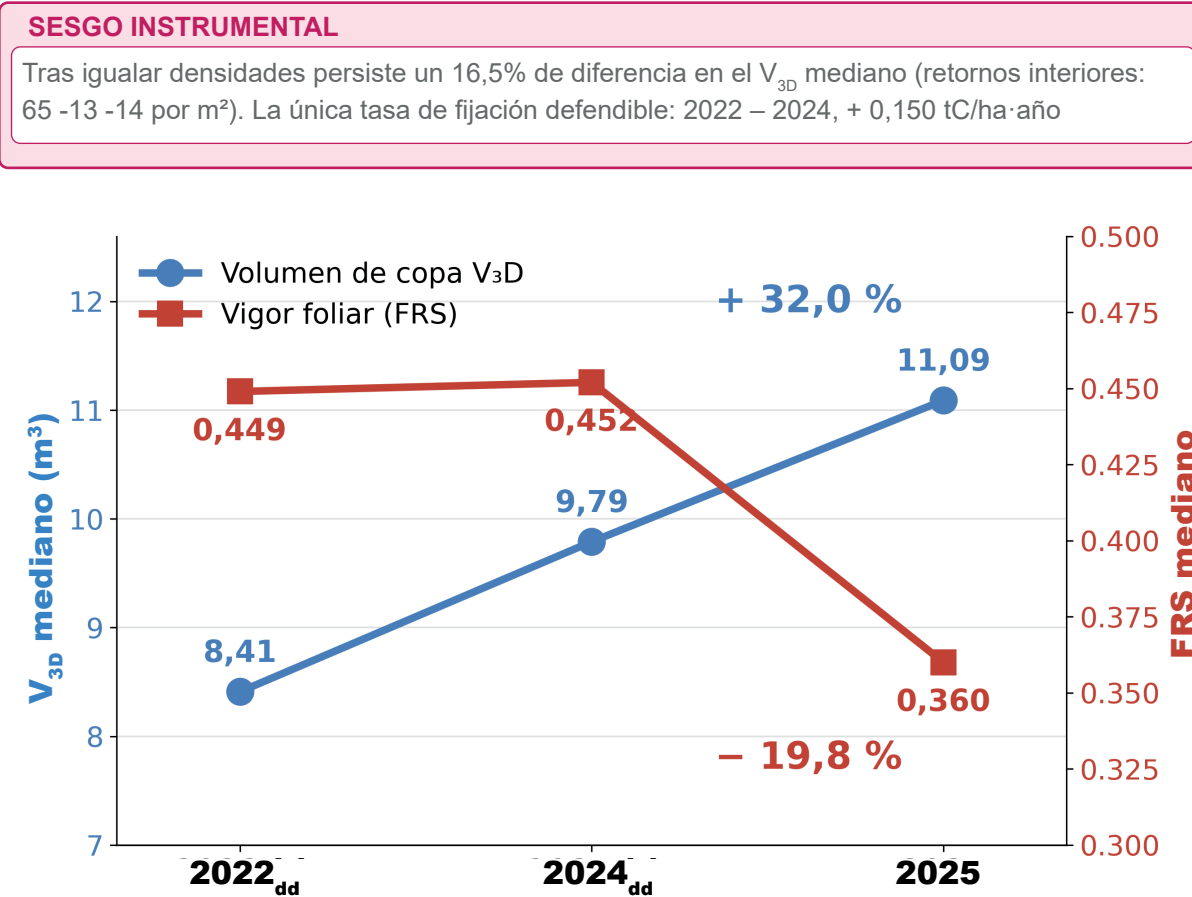


Figura 2. Comparativa de las trayectorias multitemporales medianas del V3D (eje azul en m³) y la FRS (eje rojo) en las campañas 2022, 2024 y 2025. El V3D crece un 32,0% mientras el vigor foliar retrocede un 19,8%.

Vigor foliar y validación espectral

El FRS y el LAI efectivo miden el vigor por caminos distintos. El primero describe el reparto vertical de los retornos dentro de la copa y puede calcularse en las tres campañas. Clasifica los individuos segmentados en: Sano, Estresado, Decaído y Decaído severo. Mientras tanto, el LAI efectivo deriva de la Ley de Beer-Lambert y tiene fundamento físico, pero solo es estimable sobre las nubes originales de 2022 y 2024. Entre esas dos fechas el FRS cae un 2,4% y el LAI efectivo 8,4%, tres veces y media más deterioro, y lo hace de forma sostenida en las seis clases de altura y en ambas tipologías.

Detrás de ambas señales hay un mismo comportamiento: la sabina conserva la arquitectura rígida de tallos y ramas principales, y con ella el V3D, mientras defolia el manto exterior de la copa frente a la sequía prolongada. El pardeamiento registrado por la estación PhenoCam entre 2022 y 2025 corrobora el proceso de forma independiente.

VALIDACIÓN ESPECTRAL (n = 2.544)
LAI_e vs NDVI: p = +0,664 (p < 10⁻³⁰⁰), parcial +0,607 | FRS vs NDVI: p = +0,245, parcial +0,102.
Mecanismo verificado: p(P_gap, NDVI) = -0,664 (la apertura del dosel expone arena desnuda de bajo NDVI).

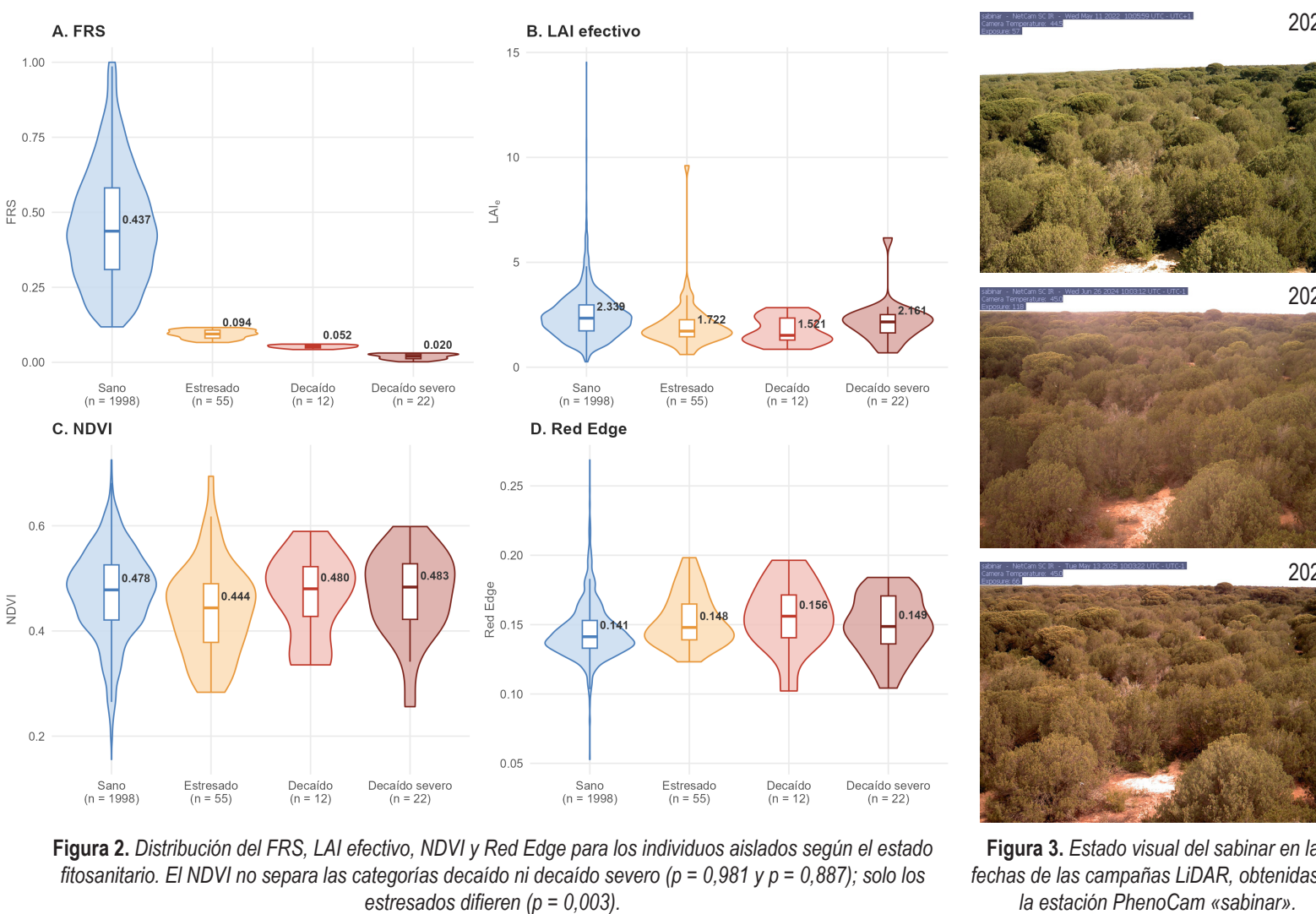


Figura 3. Estado visual del sabinar en las fechas de las campañas LiDAR, obtenidas de la estación PhenoCam «sabinar».

VI - CONCLUSIONES

1 - Viabilidad y límites del inventario individual.

El algoritmo (Li2012 + semillas CHM + DBSCAN) detecta el 96,4 % de las copas de referencia con la nube combinada MERGE (MLS + dron), aportando el escaneo terrestre un incremento de +7,1 pp frente al dron en solitario (89,3 %). El fraccionamiento de copas es el punto débil, el 56,0 % de las referencias aparecen fraccionadas, con independencia del sensor, comportamiento inherente al criterio de conectividad vertical sobre arquitecturas complejas como las del cabinar.

2 - La homogeneización estabiliza el conteo, no el volumen.

La desdensificación a 100 pts/m² mantiene estable la demografía (-3,3 % y -2,9 % de individuos), pero conserva un 16,5 % de sesgo residual en el volumen (V_{3D}), originado en la distinta tasa de retornos interiores (65 | 132 | 14 por m²). Solo el intervalo 2022–2024 admite una tasa de fijación defendible: +0,150 tC/ha-año.

3 - Desacoplamiento entre estructura y vigor.

La masa forestal mantiene su densidad (~378 ind./ha) y un crecimiento aparente en volumen (+32,0 % de V_{3D}) y stock de carbono (4,17 a 5,37 tC/ha). Sin embargo, el vigor foliar (FRS) retrocede un 19,8 %, y el descenso no es progresivo: entre 2022 y 2024 afecta al 51,2 % de los pies, proporción indistinguible del azar, y entre 2024 y 2025 al 77,1% (corroborado por PhenoCam). El evaluar la biomasa únicamente mediante la envolvente exterior enmascara la degradación interna.

4 - Complementariedad entre el FRS y el LAI efectivo.

El FRS actúa como indicador operativo multitemporal para toda la serie, ya que cubre las cinco nubes y sostiene la corrección fitosanitaria. El LAI efectivo, estimable solo en las nubes originales de 2022 y 2024, aporta el fundamento físico y la única validación espectral independiente (p = +0,664 con el NDVI; +0,607 al controlar por altura).

VII - BIBLIOGRAFÍA

- Estornell, J., Ruiz, L. A., Velázquez-Martí, B., & Fernández-Sarría, A. (2011). Estimation of shrub biomass by airborne LiDAR data in small forest stands. *Forest Ecology and Management*, 262(9), 1697–1703.
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K., & Kelly, M. (2012). A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(1), 75–84.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. IGES
- Villar, R., Martínez, F., Martín, A., & Merino, J. (1997). Biomass of the *Juniperus phoenicea* forest in the sand dune ecosystems of the Doñana National Park. En F. García Novo, R. M. M. Crawford, & M. C. Díaz Barradas (Eds.), *The Ecology and Conservation of European Dunes* (pp. 135–141). Universidad de Sevilla.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501.