



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1252

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





1º Inventario Nacional Forestal de Andorra. Breve descripción de los métodos y primeros resultados.

BELTRÁN BARBA, M. (1), DOMÉNECH FERRÉS, M. (2), BUSQUETS OLIVÉ, E. (1), TRAVESSET-BARO, O. (2), LLENA GASOL, G. (1), PIQUÉ NICOLAU, M. (1) (1) Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Catalunya (CTFC). (2) Andorra Recerca + Innovació (AR+I).

Resumen

El Primer Inventario Nacional Forestal de Andorra se presenta como una herramienta básica de la política forestal del país, especialmente para la gestión y conservación de los bosques y el seguimiento de los servicios ecosistémicos. Las medidas sobre el terreno se realizaron en 2022 y los primeros resultados y la base de datos se presentaron en público en 2024.

Las 18.227 ha de bosques se muestrean con 194 parcelas permanentes, que representan los 14 hábitats forestales diferentes. Sobre el terreno se toman datos para caracterizar la estructura y composición de los bosques y se sientan las bases para el estudio de su evolución a lo largo del tiempo.

Además de los datos, se presenta una primera estimación del carbono almacenado actualmente, así como de la capacidad de los bosques andorranos para fijar carbono. Además, con el uso de datos LiDAR aéreos de 2018, se ha generado una cartografía en continuo de las características silvo-dasométricas principales presentadas en mapas de variables biofísicas. Este inventario no solo facilita la toma de decisiones informadas para la gestión forestal, sino que también promueve la sostenibilidad y la resiliencia de los ecosistemas forestales de Andorra.

Palabras clave

Dasometría, bosques, biodiversidad, bioeconomía, carbono

1. Introducción

El Primer Inventario Nacional Forestal de Andorra (INF1-AND), elaborado entre 2022 y 2024 por Andorra Recerca + Innovació (AR+I) y el Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Catalunya (CTFC), es una herramienta fundamental para la política forestal del país, enfocándose en la gestión y conservación de los bosques y el seguimiento de los servicios ecosistémicos. En el portal del Laboratori Forestal d'Andorra se ofrecen los principales resultados, que son las bases de datos y de cartografía y tres publicaciones temáticas: Métodos de inventario (BELTRÁN *et al.*, 2023a), Estimación del stock y el sumidero de carbono (BELTRÁN *et al.*, 2023b) y Mapas de Variables Biofísicas (BELTRÁN *et al.*, 2024).

Según el Mapa de Cubiertas del suelo de 2012 (CENMA/IEA, 2012), Andorra tiene unas 19.000 ha de bosque, un 40% de la superficie total del país, con un incremento del 2% observado en 17 años (1995-2012). Disponer de información detallada de los recursos naturales tiene una aplicabilidad directa en la gestión, definición de políticas y estrategias de aprovechamiento sostenible, conservación y disfrute de los servicios ecosistémicos. También es clave para la planificación estratégica, toma de decisiones ambientales, seguimiento de cambios e impactos, y la investigación. Los datos pueden integrarse con información de sanidad forestal, biodiversidad o ecología.

En Europa, diversas entidades han abordado la necesidad de información armonizada con Inventarios Forestales Nacionales, coordinados en la European National Forest Inventory Network (ENFIN). La nueva estrategia forestal europea para 2030 busca garantizar la gestión forestal sostenible y reforzar la contribución



de la Unión Europea a la lucha contra la deforestación global. Esta estrategia, parte del European Green Deal, se relaciona con las estrategias de biodiversidad y bioeconomía y se complementa con reglamentos que articulan la información forestal y ambiental a recopilar. Destaca la propuesta de Reglamento sobre un marco de seguimiento para lograr bosques europeos resilientes. Aunque Andorra no es miembro de la UE, su contexto socioeconómico y biogeográfico justifica la alineación de políticas ambientales.

A nivel internacional, los objetivos REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation) de la FAO se centran en reducir las emisiones por deforestación y degradación forestal. La FAO apoya a los países en sus procesos REDD+ y en la conversión de compromisos políticos en acciones concretas. Tanto la estrategia forestal europea como los objetivos REDD+ requieren datos fiables para su correcta aplicación.

Cabe destacar que la cuantificación del carbono almacenado y de la capacidad de fijación de carbono de los bosques es una materia primordial en el contexto actual de cambio climático y global. En Andorra, aparte de las estimaciones generales siguiendo la metodología del IPCC, se realizó un estudio preliminar en el año 2009 extrapolando datos del Inventario Forestal Nacional de España para las mismas especies. Sin embargo, hasta ahora no se disponía de datos medidos en toda la superficie forestal del país para realizar cálculos más ajustados a la realidad de los bosques andorranos.

Andorra aborda su primer Inventario Forestal Nacional en 2022. Los países vecinos, sin embargo, ya han realizado varios ciclos de inventario. España hizo su primer IFN en 1964 y hoy en día ya se dispone de la 4ª edición en determinados territorios (Cataluña y Aragón, entre otros) e incluso se dispone a abordar su 5º ciclo. Francia comenzó en 1958, con metodologías y ciclos de muestreo diferentes a España. La Figura 1 muestra la ubicación de las parcelas de los IFN francés y español alrededor de Andorra.

La experiencia de los países vecinos es una oportunidad para desarrollar el INF1-AND con ajustes definidos a las necesidades actuales y permite innovar en métodos, destacando la teledetección y LiDAR/RADAR para mejorar la calidad y precisión de la caracterización de los bosques. En Andorra se dispone de datos LiDAR aéreos de 2018 que cubren todo el territorio, captando la variabilidad de la superficie boscosa y permitiendo extender la información obtenida de las parcelas de inventario. La red de parcelas permanentes proporciona la verdad-terreno para la teledetección.

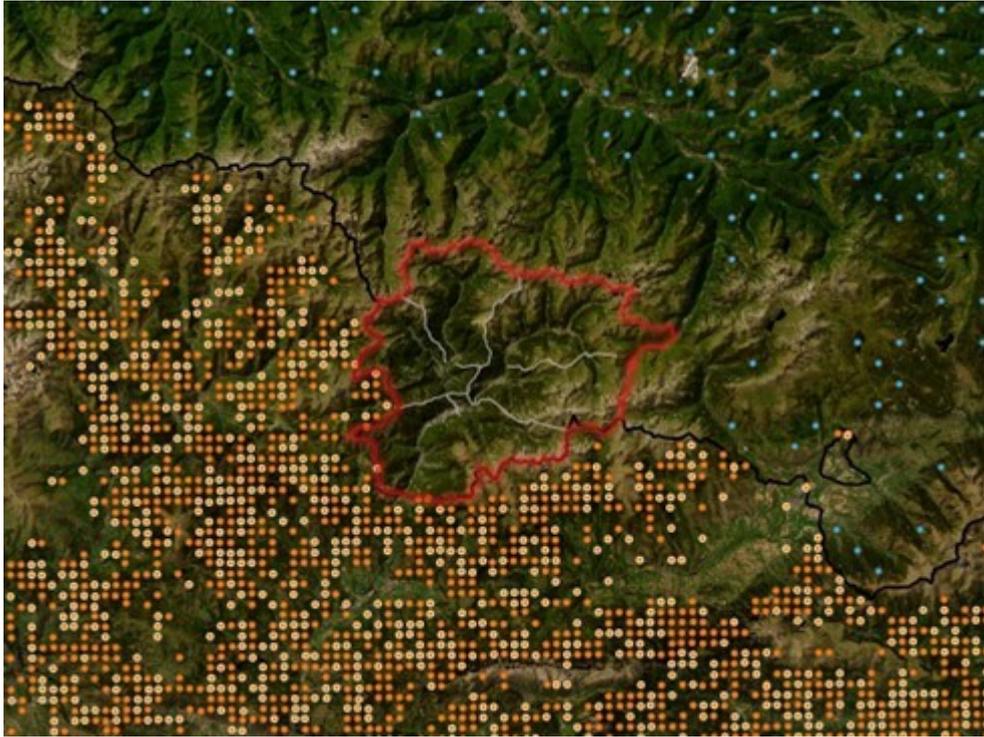


Figura 1. Localización de las parcelas de los Inventarios Forestales Nacionales alrededor de Andorra: España, en naranja oscuro IFN3 (DGCN, 2005) y naranja-blanco IFN4 (DGDRPF, 2017) y Francia, en azul (IGN, 2022).

2. Objetivos

El principal objetivo del 1º INF de Andorra es establecer la metodología y el diseño de una red de parcelas para el muestreo de las principales variables silvodasmétricas, permitiendo la caracterización de los diferentes tipos de bosques del Principado. A largo plazo, esta red se plantea como un dispositivo de seguimiento permanente que proporcione datos sobre la evolución de la cubierta forestal arbolada.

Además, el INF se plantea como una fuente de información básica para el estudio de una amplia gama de factores relacionados con los bosques, como la cantidad y tipo de biomasa, el almacenamiento y capacidad de fijación de carbono atmosférico, el funcionamiento ecohidrológico y la capacidad de acogida de biodiversidad. Esta red básica puede complementarse con otros sistemas de seguimiento para ampliar la información utilizada en los análisis del ecosistema andorrano y pirenaico.

La presente comunicación tiene como objetivo presentar brevemente la metodología y los principales resultados del primer Inventario Nacional Forestal de Andorra en cuanto al establecimiento de la red de parcelas permanentes y el diseño del muestreo realizado como primera medida. De ello se obtienen resultados silvodasmétricos, que incluyen información sobre la estructura y composición de los bosques y una estimación de la capacidad de los bosques en la captura y almacenamiento de carbono. Adicionalmente, mediante modelización de los datos obtenidos junto con el LiDAR se obtiene la cartografía en continuo de las principales variables biofísicas.

3. Metodología

Diseño de la red de parcelas permanentes



Dada la proximidad, similitud y conectividad de los bosques de Andorra respecto a los bosques del Pirineo Catalán, para la distribución de las parcelas permanentes del INF de Andorra se aplicó una densidad de muestreo equivalente a la del IFN de España. Así, para la ubicación teórica de las parcelas se siguió una cuadrícula de 1 x 1 km alineada con la del IFN-ESP, superpuesta a la superficie forestal arbolada de Andorra. Esta distribución equivale a una densidad orientativa de 1 parcela por cada 100 ha.

La superficie forestal arbolada de Andorra se identifica a partir del Mapa digital de los Hábitats de Andorra del año 2012 (CARRERAS *et al.*, 2012), que sigue las definiciones CORINE. Adicionalmente se ha incorporado la delimitación de los Bosques de protección y defensa de todas las parroquias, del CENMA-IEA. Con estas dos fuentes de información se han definido los estratos de inventario para el INF, siguiendo la clasificación de los hábitats de bosque y priorizando los bosques de protección como estrato propio. En total se identifican 15 estratos (Figura 2), siempre manteniendo la información del hábitat que representan. Por último, para mejorar la delimitación de estos estratos se ha aplicado un filtro que elimina toda aquella cubierta no forestal identificada por el Mapa de Cubiertas del Suelo de Andorra de 2012 (CENMA/IEA, 2012) (roquedos, superficie agrícola, infraestructuras y otros no forestales), que tiene una definición más esmerada que el mapa de hábitats.

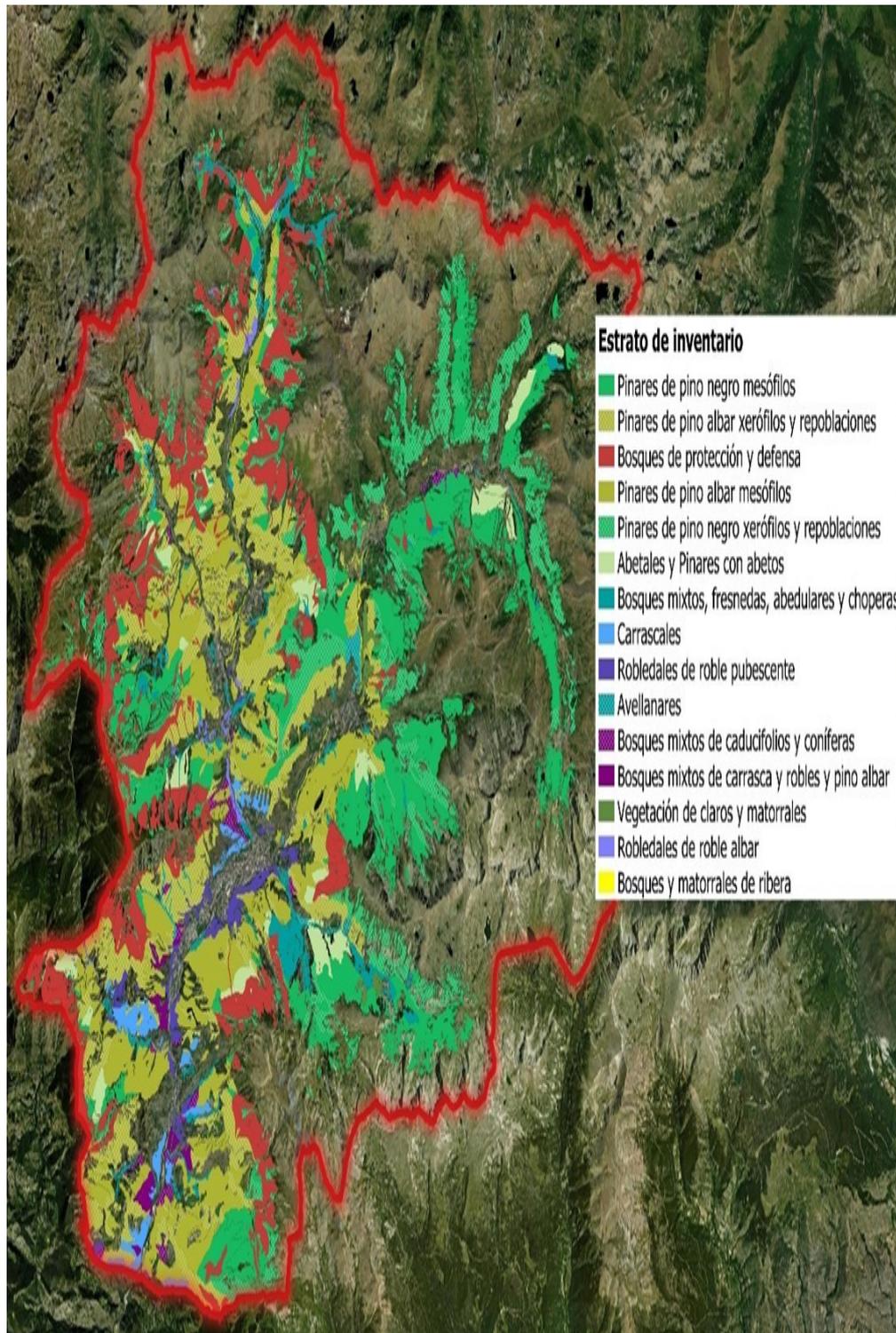


Figura 2. Estratos de la superficie forestal arbolada de Andorra empleados para la distribución de las parcelas permanentes del Inventario Nacional Forestal.

Para la definición de la ubicación de las parcelas se incorporan dos condicionantes transversales. Primero, todas las parcelas deben situarse en bosques públicos (según la información cartográfica de que dispone AR+I). En Andorra, los bosques públicos ocupan más de 90% del total de bosques. Segundo, las parcelas del inventario ICP Forests (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) se incorporan como puntos de muestreo del INF, reemplazando el punto más cercano de la malla



teórica de 1 x 1 km.

Como resultado de la superposición de la malla de 1 x 1 km sobre los estratos de la superficie forestal arbolada identificados, y teniendo en cuenta los condicionantes comentados, se obtuvo una primera distribución de 193 puntos de inventario (94,44 ha arbolados por parcela). Posteriormente se añadieron o eliminaron manualmente puntos de inventario para equilibrar la muestra entre estratos (con la referencia de 1 punto por cada 100 ha), en la medida de lo posible según los condicionados de ubicación de las parcelas. Por último, se revisaron las ubicaciones teóricas de estos puntos de muestreo sobre ortofoto para hacer pequeños ajustes, para evitar ubicaciones sobre carreteras, pistas, canchales u otras alteraciones de la cubierta y facilitar el trabajo de replanteo en campo.

La ubicación final de las parcelas se decidió sobre el terreno, manteniendo la distribución preliminar como referencia. El replanteo en campo debe mantener el estrato de inventario correspondiente, la propiedad del terreno (bosque público) y otras características observables sobre ortofoto (orientación general, densidad de arbolado orientativa). Se consideró un margen de 100 m de radio respecto al punto teórico como distancia máxima a mantener (10% del espacio teórico). Además, hay que tener presente que la orografía de determinadas zonas puede dificultar e incluso impedir el acceso y la realización del inventario con condiciones de seguridad adecuadas, de tal manera que algunas parcelas pueden no ser replanteadas sobre el terreno. A priori se consideró un número equivalente al 5% (10 parcelas) los puntos de inventario que podían quedarse sin inventariar, aunque fue necesario valorar la afectación a la representatividad de los estratos, y valorar si fuera necesaria alguna reubicación de parcela.

El punto final de inventario debía replantearse a una distancia equivalente al doble de la altura del arbolado (aproximadamente) respecto de aperturas grandes de la cubierta: carreteras, pistas forestales, pistas de esquí, líneas eléctricas, campos de cultivo, pastos o matorrales, etc. También era necesario evitar senderos transitados y zonas de influencia de los trabajos de mantenimiento de franjas de protección y de baja carga para la prevención de incendios.

Una vez decidido el centro definitivo, cada parcela se identificó con un código único, se tomaron las coordenadas del centro con precisión submétrica (idealmente inferior a 15 cm) y se realizaron marcas permanentes en el terreno. Estas marcas consisten en clavar en el suelo un tubo de PVC de 15 cm de largo y pintar una T invertida con pintura forestal de larga duración en el árbol dominante y vital más próximo al centro (árbol T, Figura 3).

Las parcelas se planteaban circulares de 12 m de radio (452m²) en plano horizontal por defecto, y variable según la densidad arbolada. La magnitud del número de árboles a inventariar es de más de 30 y de menos de 100 pies de Dn >7,5 cm, de manera que se podrá variar el radio de la parcela para ajustarse a la densidad, siempre fijando un radio mínimo de 8 m y máximo de 20 m.



Figura 3. Marca de T invertida en el árbol de referencia respecto al centro de parcela, con el tubo de pvc clavado en el suelo.

Medidas a tomar sobre el terreno

Respecto a los datos de campo, en las parcelas del 1º Inventario Nacional Forestal de Andorra, se tomaron/realizaron las siguientes medidas/estimaciones:

- **Datos básicos.** Código de la parcela, radio utilizado para el muestreo, equipo de trabajo, fecha y hora de la medición, coordenadas geográficas, distancia y rumbo desde el árbol T y fotografías tomadas en las direcciones norte, sur, este, oeste y desde el perímetro sur hacia el centro (NSEOP).
- **Árboles inventariables dentro del radio.** Para cada árbol de diámetro normal ($h=1,3$ m) igual o superior a 7,5 cm, se anota la especie y el estado de aspecto en una escala del 1 al 5 (1: vivo, 2: vivo con decaimiento, 3: muerto reciente, 4: muerto sin hojas ni ramillas, 5: estaca). Se anota el diámetro normal de todos los árboles y la altura total de los cinco árboles más cercanos al centro de la parcela, excluyendo aquellos suprimidos y muertos. También se registró la altura de la base de la copa y el diámetro de la copa en cruz de estos 5 árboles cercanos.
- **Sotobosque dentro del radio.** Se realiza un conteo de los pies no inventariables con una altura superior a 1,3 metros, clasificándolos en dos clases diamétricas (CD0 y CD5). Se estima el recubrimiento y la altura del sotobosque, identificando las tres especies principales arbóreas y arbustivas. Además, se evaluó la cobertura del estrato herbáceo, el suelo



- desnudo y la rocosidad.
- **Madera muerta en el suelo.** Se mide el diámetro medio y la longitud de todas las piezas de madera muerta en el suelo con un diámetro superior a 17,5 cm, registrando el estado de descomposición en una escala del 1 al 3. Solo se mide la parte de la pieza que queda dentro de la parcela, en caso de que estuviera parcialmente fuera.
- **Vulnerabilidad al fuego de copas,** utilizando las CVFoC de Piqué et al. (2011), según la especie dominante. Se consideran los recubrimientos, las alturas y las distancias verticales de los estratos de combustible de superficie, de escala y aéreo.
- **Otras observaciones.** Se registra información cualitativa de interés, como marcas de actuaciones selvícolas, signos de erosión, presencia de plagas o enfermedades y cavidades en los árboles.
- **Captura de datos LiDAR UAV.** En algunas parcelas se realizó la captura de datos LiDAR utilizando un dron, para disponer de información aparejada con las medidas de campo.

Cálculo de los parámetros silvodasométricos

Con los datos medidos/estimados de cada parcela se calculan las principales variables silvo-dasométricas extrapoladas a la hectárea, por parcela y agregando los datos por estratos de inventario. El principal objetivo es generar los datos que alimentan la estimación del carbono almacenado y de la capacidad de fijación, así como los necesarios para generar los Mapas de Variables Biofísicas, En concreto se calculan los siguientes parámetros:

- **Altura total** (Ht, m) de todos los árboles, como paso previo, mediante ecuaciones alométricas (Tabla 1). Para *Abies alba*, *Betula pendula*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Quercus pubescens* y *Quercus ilex rotundifolia* se dispone de suficientes datos Dn-Ht medidos para poder elaborar alometrías propias y, además, en el caso del pino silvestre y del pino negro los datos permiten generar alometrías diferentes según si se encuentran en hábitat xerófilo o mesófilo. Para el resto de especies se aplican las alometrías disponibles en el Laboratorio Forestal Catalán (LFC) con el origen que se indica en la tabla para cada especie, según sea el IFN3, por provincias, o el Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (Gracia *et al.*, 2004) (IEFC), por comarcas o general de Cataluña. Se ha seleccionado la alometría que menor error generaba respecto a los datos medidos de cada especie, en aquellas 10 especies con datos disponibles del INF1-AND pero no suficientes para generar una alometría propia. Para las restantes 9 especies sin datos de Ht medidos pero presentes en el inventario con datos de Dn se ha seleccionado la alometría correspondiente a la zona más próxima siempre que la muestra de origen tuviera más de 100 datos, o bien el coeficiente R^2 fuera superior a 0,75.
- **Área Basimétrica** (AB, m^2/ha), **Diámetro medio cuadrático** (Dg, cm) y **Densidad de pies vivos inventariables** (N, pies/ha), **Altura media** (Hm, m), **Altura dominante de Assman** (H_0 , m; como altura media de los 100 árboles/ha de mayor diámetro), como cálculos directos.
- **Volumen con corteza de la madera viva** (VAE, m^3/ha) y el **Incremento Anual de Volumen con Corteza de madera viva** (IAVC, $m^3/ha \cdot año$), mediante ecuaciones alométricas (Tabla 2 y Tabla 3). En este caso de VAE e IAVC se ha seleccionado la alometría disponible del IFN de la provincia más



próxima a Andorra, en general Lleida, y priorizando la ecuación utilizada en el IFN2 respecto a la del IFN3. Para cada especie se selecciona la misma fuente para VAE y para IAVC. Sin embargo, algunas especies, las poco frecuentes, pueden no tener ecuación disponible en el IFN de Cataluña, y en estos casos se aplica la ecuación de una especie cercana en sentido fisiológico (por ejemplo, a *Betula pubescens* se le aplica la ecuación de *Betula pendula*).

- **Volumen aparente de la madera muerta (VMM,m³/ha)**, como cálculo directo en el caso de piezas de madera en el suelo o estacas sin ramas. En el caso de árboles muertos en pie con ramas se cubican con el método de los árboles vivos.
- **Recubrimiento y altura media total y para las tres especies principales del matorral y del regenerado(%)** como cálculo directo.

Tabla 1. Ecuaciones alométricas empleadas para calcular la altura total de todos los árboles a partir del diámetro normal. Proviene del Laboratorio Forestal Catalán excepto las indicadas como "INF1-AND" que han sido elaboradas con datos propios. *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* se diferencian para los hábitats xerófilos (*Ps_x*, *Pu_x*) y mésofilos (*Ps_m*, *Pu_m*).

Especie	Ht=f(Dn)	a	b	Origen
Aa	Ht (m) = a·Dn ^b	1,4389	0,7255	INF1-AND
Ac	Ht (m) = a·Dn ^b	3,63122896	0,298391063	IFN3-Lleida
Amon	Ht (m) = a·Dn ^b	2,540580273	0,359469444	IEFC-Alt Empordà
Bpe	Ht (m) = a·Dn ^b	2,2258	0,5314	INF1-AND
Bpu	Ht (m) = a·Dn ^b	4,218613902	0,364596064	IFN3-España
Bus	Ht (m) = a·Dn ^b	4,096881846	0,11674449	IFN3-Lleida
Coa	Ht (m) = a·Dn ^b	8,027291298	-0,100152373	IEFC-Cerdanya
Crm	Ht (m) = a·Dn ^b	1,201610374	0,687940176	IFN3-Lleida
Fe	Ht (m) = a·Dn ^b	3,011867523	0,536519587	IEFC-Cerdanya
Ila	Ht (m) = a·Dn ^b	3,161551952	0,378243208	IEFC-Catalunya
Jr	Ht (m) = a·Dn ^b	2,975996949	0,475910814	IFN3-Lleida
Juc	Ht (m) = a·Dn ^b	1,1985991	0,756500661	IEFC-Catalunya
Pa	Ht (m) = a·Dn ^b	1,784385175	0,62843692	IFN3-Lleida
Pon	Ht (m) = a·Dn ^b	1,349214435	0,851224959	IEFC-Noguera
Pot	Ht (m) = a·Dn ^b	3,089689255	0,509431779	IEFC-Catalunya
Ps_x	Ht (m) = a·Dn ^b	2,2485	0,5067	INF1-AND



Ps_m	Ht (m) = a·Dn ^a b	2,9159	0,4898	INF1-AND
Pu_x	Ht (m) = a·Dn ^a b	4,3740	0,2806	INF1-AND
Pu_m	Ht (m) = a·Dn ^a b	3,2135	0,3974	INF1-AND
Qh	Ht (m) = a·Dn ^a b	1,6962	0,5586	INF1-AND
Qir	Ht (m) = a·Dn ^a b	0,4886	0,9636	INF1-AND
Qpe	Ht (m) = a·Dn ^a b	2,227287854	0,470756623	IFN3-Lleida
Rha	Ht (m) = a·Dn ^a b	1,876510034	0,520784365	IFN3-Alava
Saa	Ht (m) = a·Dn ^a b	2,588857303	0,388467304	IFN3-Lleida
Sac	Ht (m) = a·Dn ^a b	1,858492732	0,623984039	IEFC-Pallars Sobirà
Sau	Ht (m) = a·Dn ^a b	4,229165159	0,374770679	IFN3-Barcelona
Tp	Ht (m) = a·Dn ^a b	3,8162356	0,363092449	IFN3-Lleida

Tabla 2. Ecuaciones alométricas empleadas para calcular VAE de todos los árboles a partir del diámetro normal y la altura total.

Especie	VAE=f(Dn, Ht)	a	b	Origen
Aa	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	137,88	0,0003032	IFN3-Lleida
Ac	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	35,74	0,00021	IFN3-Lleida
Amon	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	35,74	0,00021	Ac
Bpe	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	12,68	0,0002535	IFN3-Lleida
Bpu	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	12,68	0,0002535	Bpe
Bus	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	13,14	0,0002358	Crn
Coa	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	-5,35	0,000365	IFN3-Lleida
Crn	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	13,14	0,0002358	IFN3-Barcelona
Fe	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	37,56	0,0002307	IFN3-Lleida
Ila	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	28,73	0,0003222	IFN3-Girona
Jr	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	109,53	0,0001481	IFN3-Lleida-Otros planifolios
Juc	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	20,57	0,0002687	IFN3-Lleida
Pa	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	13,14	0,0002358	IFN3-Lleida
Pon	VAE (dm3) = a + b·((Dn·10)) ² ·Ht	27,37	0,0002311	IFN3-Lleida

Pot	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	27,33	0,0002783	IFN3-Lleida
Ps	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	30,83	0,000321	IFN3-Lleida
Pu	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	77,94	0,0002743	IFN3-Lleida
Qh	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	29,62	0,0002156	IFN3-Lleida
Qir	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	22,48	0,0001262	IFN3-Lleida
Qpe	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	12,18	0,0003025	IFN3-Lleida
Rha	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	13,14	0,0002358	Crn
Saa	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	109,53	0,0001481	IFN3-Lleida
Sac	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	109,53	0,0001481	IFN3-Lleida
Sau	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	98,05	0,0000884	IFN3-Lleida
Tp	$VAE (dm3) = a + b \cdot ((Dn-10))^2 \cdot Ht$	58,56	0,000209	IFN3-Lleida

Tabla 3. Ecuaciones alométricas empleadas para calcular IAVC de todos los árboles a partir del volumen con corteza o a partir del diámetro normal.

Especie	IAVC1=f(VAE); IAVC2=f(Dn)	a	b	c	Origen
Aa	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	8,12	0,0133424	-0,0000006	IFN2-Lleida
Ac	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	14,03	0,0845783	-0,0000455	IFN2-Lleida
Amon	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	14,03	0,0845783	-0,0000455	Ac
Bpe	$IAVC = a + b \cdot (Dn-10) + c \cdot (Dn-10)^2$	-1,91341073	0,0273012		IFN3-Lleida
Bpu	$IAVC = a + b \cdot (Dn-10) + c \cdot (Dn-10)^2$	-1,91341073	0,0273012		Bpe
Bus	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	15,03	0,1034843	-0,0000474	Crn
Coa	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	4,78	0,0283627	-0,0000014	IFN2-Lleida
Crn	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	15,03	0,1034843	-0,0000474	IFN2-Barcelona
Fe	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	3,54	0,0250003	-0,0000041	IFN2-Lleida
Ila	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	3,54	0,0250003	-0,0000041	IFN2-Girona
Jr	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	4,78	0,0283627	-0,0000014	IFN2-Lleida-Altres planifolis
Juc	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	0,68	0,0109947	-0,0000017	IFN2-Lleida
Pa	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	15,03	0,1034843	-0,0000474	IFN2-Lleida
Pon	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	1,91	0,0487213	-0,0000069	IFN2-Lleida



Pot	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	14,67	0,0343113	-0,0000064	IFN2-Lleida
Ps	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	3,9	0,0162104	-0,0000019	IFN2-Lleida
Pu	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	3,32	0,0105025	-0,0000019	IFN2-Lleida
Qh	$IAVC = a + b \cdot (Dn-10) + c \cdot (Dn-10)^2$	-2,09069	0,0293531	-0,000013	IFN3-Lleida
Qir	$IAVC = a + b \cdot (Dn-10) + c \cdot (Dn-10)^2$	-0,54400023	0,0093127		IFN3-Lleida
Qpe	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	1,23	0,0169616	-0,0000062	IFN2-Lleida
Rha	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	15,03	0,1034843	-0,0000474	Crn
Saa	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	4,78	0,0283627	-0,0000014	IFN2-Lleida
Sac	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	4,78	0,0283627	-0,0000014	IFN2-Lleida
Sau	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	4,78	0,0283627	-0,0000014	IFN2-Lleida
Tp	$IAVC = a + b \cdot VAE + c \cdot VAE^2$	3,54	0,0250003	-0,0000041	IFN2-Girona

Estimación del carbono almacenado y de la capacidad de fijación

Partiendo de las medidas del arbolado, del matorral y de la madera muerta de las parcelas INF, se realizan los cálculos por unidad de superficie hasta la cuantificación del carbono de las diferentes fracciones, a partir de los cuales se obtiene la cuantificación total para los bosques de Andorra. En concreto, se han considerado las siguientes variables:

- Carbono Aéreo Total del arbolado (CAT, t/ha) y Carbono Subterráneo Total del arbolado (CST, t/ha)**, partiendo del cálculo de Biomasa Aérea y Subterránea Total del arbolado (BAT y BST, t/ha) utilizando ecuaciones alométricas. Las alometrías que permiten estimar a cada árbol BAT y BST, que se transforman en CAT y CST multiplicando por 0,5, provienen del IEFC a escala de Cataluña para el BAT y de la base de datos del Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA, CSIC) para el BST y se refieren para el ámbito de España (MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ *et al.*, 2021). Las alometrías tienen la forma: $BAT(kg) = a \cdot Dnb \cdot Ht$ y $BST(kg) = a \cdot Dnb$.
- Incremento Anual de Carbono Aéreo Total del arbolado (ICAT, t/ha·año) e incremento Anual de Carbono Subterráneo Total del arbolado (ICST, t/ha·año)**, partiendo de la estimación del incremento anual de volumen con corteza (IAVC). La estimación del ICAT se basa en una aproximación de la proporción de VAE según el BAT individual. Es decir, se estima el incremento total de biomasa (carbono) en base al incremento total de madera según la relación observada entre biomasa total (kg) y volumen de madera (dm³) a escala de árbol, ajustando por separado las coníferas y las frondosas (Figura 4). El IAVC se añade al VAE observado y el VAE resultante se transforma en BAT según esta relación y este en ICAT con la relación estandarizada de 1 tonelada de carbono por cada 2 toneladas de biomasa. Después se computa el ICAT como la diferencia entre el carbono estimado con y sin el incremento añadido. La estimación del ICST se realiza de manera parecida a partir del IAVC, basándose en la relación entre BST (kg) y VAE (dm³) individual, igualmente separando coníferas de frondosas



(Figura 5). El IAVC se añade al VAE observado y el VAE resultante se transforma en BST según esta relación y este en ICST multiplicando por 0,5. Después se computa el ICST como la diferencia entre el carbono estimado con y sin el incremento añadido.

- **Carbono almacenado en el estrato arbustivo** (C_{Arb}, t/ha), a partir de la estimación de biomasa aérea realizada con el uso del paquete MedFuels según detallan DE CÁCERES et al. (2019). Con este paquete, en cada parcela y para cada especie de matorral de la que se dispone de la estimación del recubrimiento (%) y la altura media (cm) se calcula el fitovolumen (PHV) del individuo equivalente, variable con la que se estima la biomasa con ecuaciones alométricas. Hay ecuaciones disponibles para diversas especies y para grupos funcionales, con la forma $BAT (kg) = a \cdot PHV^b$. Con la biomasa del individuo equivalente, el paquete aplica unas ecuaciones de extrapolación en base a la densidad estimada, que se deriva de los propios datos de recubrimiento y altura media, y finalmente se obtiene un valor de biomasa total en t/ha que se convierte en Carbono multiplicando por 0,5.
- **Carbono de la Materia Orgánica del Suelo** (CMO, t/ha). Dado que no ha sido objeto de medida directa en las parcelas del INF, se ha realizado una estimación a partir de la información proporcionada por las formaciones arboladas en la España peninsular y Baleares de LÓPEZ-SENEPLEDA et al. (2021), ajustándose a las características propias de los bosques de Andorra. Se ha hecho una aproximación a partir de la información disponible para las tres comarcas catalanas vecinas (Pallars Sobirà, Alt Urgell y Cerdanya), con similitudes físico-climáticas y biogeográficas. En primer lugar, a partir del visor del contenido de C acumulado en el horizonte orgánico del ICIFOR-INIA, CSIC, que mapifica los resultados de LÓPEZ-SENEPLEDA *et al.* (2021), se ha calculado un valor medio de stock de C en cada polígono del Mapa Forestal de España 1:25.000 de las tres comarcas seleccionadas. A estos polígonos se les ha incorporado el dato de altitud. Se han conservado únicamente los polígonos con formaciones forestales que están presentes en Andorra y que tienen una altitud superior a los 800 m, ya que toda la superficie forestal arbolada de Andorra se encuentra por encima de esta altitud y esta variable es un factor que influye en la cantidad de carbono en la materia orgánica del suelo. A continuación, se ha calculado el valor medio de Biomasa Aérea Total de cada polígono del Mapa Forestal de España 1:25.000 (DGDRPF, 2016; MFE25) seleccionado a partir del Mapa de Variables Biofísicas del arbolado de Cataluña (ICGC, 2018). Para estimar un valor de carbono en la superficie forestal de Andorra, a partir de la información generada se ha elaborado un modelo lineal generalizado (GLM), con la altitud y la Biomasa Aérea Total (BAT) como variables independientes, para las diferentes formaciones forestales analizadas. La Tabla 4 muestra las características de los datos de partida de BAT, Altitud y Carbono orgánico de los 6.329 polígonos correspondientes al MFE25 de las 3 comarcas seleccionadas y que corresponden con las diferentes formaciones forestales presentes también en Andorra. La Tabla 5 muestra el número de polígonos de muestra que representan a cada hábitat presente en el INF1-AND. Cabe destacar que algunos hábitats se han agrupado debido a la similitud entre ellos por la elaboración de las variables del modelo empleado. El modelo lineal generalizado tiene la forma $C = I + a * BAT + b * Altitud$. Los coeficientes por cada grupo de formaciones forestales se presentan en la Tabla 6. Este modelo ha sido



aplicado a la superficie forestal arbolada de Andorra para estimar el stock de carbono en el horizonte orgánico a escala de cada píxel de 20x20 m. Cada píxel contiene información de la formación forestal según la clasificación del hábitat de la definición de los estratos de inventario; de la altitud a partir del MDE del IDE de Andorra; y de la BAT estimada a la misma escala según se detalla en el apartado de los Mapas de Variables Biofísicas de Andorra. A partir del ráster resultante del stock de carbono se calculan la media y el total por cada estrato de inventario de la superficie forestal arbolada de Andorra.

- **Carbono almacenado en la madera muerta**(CMM, t/ha), en pie (de $D_n > 7,5$ cm y $H_t > 1,3$ m) y en el suelo ($D_m > 17,5$ cm). Los árboles muertos en pie con aspectos 3 y 4 mantienen la cabezada, de manera que la altura, si no ha sido medida, se ha estimado a partir de las alometrías de la Tabla 1 como si fueran árboles vivos. El aspecto 5 corresponde a estacas con la cabezada rota, de manera que el protocolo de inventario marca la medida de la altura en cada caso. No obstante, en caso de no disponer del dato de altura para árboles de aspecto 5 se ha aplicado la misma alometría para estimarla a partir del diámetro normal. En el caso de la madera muerta en el suelo, se ha medido el diámetro, la longitud y también se identifica el estado de descomposición. Con todos los datos de D_n y H_t para la madera muerta en pie y de D_m y L_t para la madera muerta en el suelo se estima el volumen individual. Para la madera muerta en el suelo se considera cada pieza como un cilindro. En el caso de la madera muerta en pie, para los árboles de aspecto 3 y 4 y para aquellos de aspecto 5 sin altura medida se aplican las alometrías de la Tabla 2 para estimar el volumen individual según especies. Para los árboles de aspecto 5 con altura medida igual o inferior a 3 m se estima el volumen como un cilindro, mientras que si tienen alturas medidas superiores a 3 m también se estiman como cilindros, pero aplicando un factor reductor de 0,8 dado que el diámetro medido a 1,3 m no capta la conicidad de la pieza. A partir del volumen (m^3/ha) se estima la biomasa (t/ha) y el carbono (t/ha). Debido a los procesos de descomposición, la densidad de la madera muerta es menor a la madera viva, y mucho más variable según las características y condiciones individuales. En este estudio se ha empleado el coeficiente de $0,38 t/m^3$ (y 49,46% de carbono en biomasa) para todos los casos, dado que no se dispone de suficiente información respecto a la densidad de las diferentes especies y estados de descomposición de los árboles muertos inventariados con el INF. Este valor se corresponde al establecido por STAKÉNAS et al. (2020) para el pino silvestre cuando la madera muerta es todavía dura, pero la capa exterior empieza a asado, conserva la mayoría de la corteza y hay presencia todavía de ramas pequeñas. Este tipo es lo más parecido al caso general de los árboles muertos inventariados en el INF, siempre que se asimile el pino negro al pino silvestre. Estos cálculos de carbono de la madera muerta se totalizan para la superficie forestal arbolada y sus estratos de inventario.

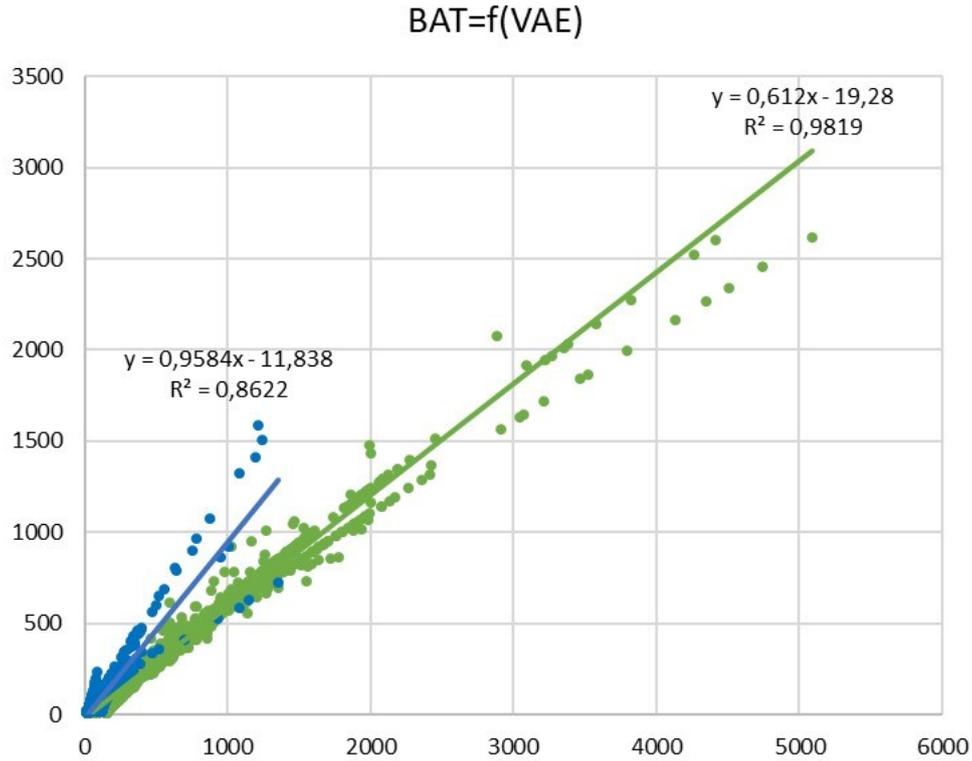


Figura 4. Relación observada entre BAT (kg) y VAE (dm³) a escala de árbol para coníferas (verde, 8.097 datos) y para frondosos (azul, 945 datos).

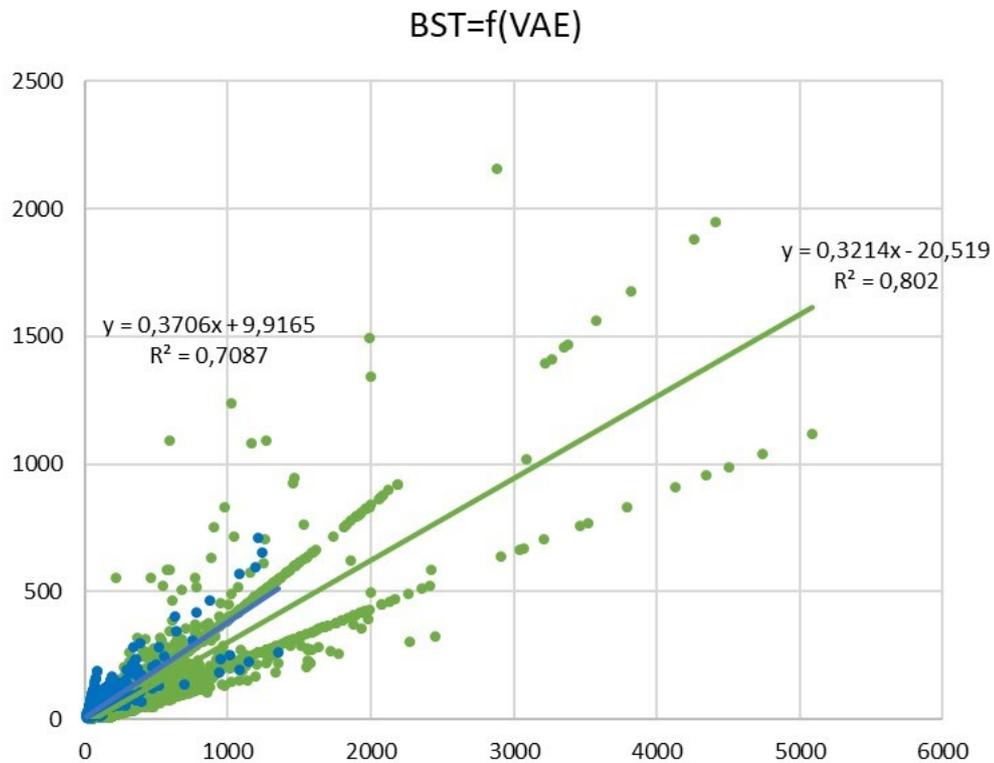


Figura 5. Relación observada entre el BST (kg) y el VAE (dm³) a escala de árbol para coníferas (verde, 8.097 datos) y para frondosos (azul, 945 datos).

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de los datos de partida procedentes de los



polígonos del MFE25 correspondientes las diferentes formaciones forestales conjuntamente con el ráster del C acumulado en el horizonte orgánico (CO) y del ráster de Biomasa Aérea Total (BAT) de la misma área de estudio.

Variable	Media	Desviación	estándar	Percentil 0	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 100	Histograma
CO	11.8	3.63	4.23	9.00	10.9	14.5	29.3		
BAT	66.3	35.3	10.1	40.0	58.4	84.9	340		
Altitud	1481	389	800	1173	1423	1780	2476		

Tabla 5. Resumen de los diferentes hábitats presentes en el INF de Andorra, con la agrupación adecuada, y la muestra de polígonos del MFE25 utilizados para la elaboración del modelo lineal para cada formación.

Grupo	Hábitat INF-AND	Código	N muestra
A	Pinares de pino negro mesófilos	PNM	1.618
	Pinares de pino negro xerófilos, y repoblaciones	PNX	
B	Pinares de pino silvestre xerófilos y repoblaciones	PRX	1.673
	Pinares de pino albar mesófilos	PRM	
C	Abetales y pinares con abetos	AVE	69
D	Carrascales	CAR	601
E	Robledales de roble pubescente	RMR	433
F	Avellanares	COR	67
G	Robledales de roble albar	RFG	66
H	Bosques y matorrales de ribera	BBR	415
I	Bosques mixtos, fresnedas, abedulares y choperas	BMF	775
	Vegetación de claros y matorrales de árboles caducifolios	VCB	
J	Bosques mixtos de caducifolios y coníferas	BMC	645
	Bosques mixtos de carrasca y robles y pino albar	BMQ	
Total			6.362

Tabla 6. Coeficientes del GLM de cada grupo de formaciones forestales para la estimación del carbono orgánico del suelo en los bosques de Andorra.

Grupo	N	Mediana de la	desviación de los	residuos	Intercepción (I)	Coeficiente BAT (a)	Coeficiente Altitud (b)	AIC
A	1.618	-0,4227	11,4834793	***	0,0193491	***	-0,0001396	7.351,8

B	1.673	0,0149	10,95	***	0,03522	***	0,0006972	.	9.013,5
C	69	0,0275	25,553486	***	0,001289	-0,006647	***		263,55
D	601	-0,6133	2,9305866	***	0,0285286	***	0,0042512	***	2.795,3
E	433	-0,6567	2,3193494	**	0,0104726	*	0,0055141	***	2.038,4
F	67	-0,8584	12,894209 2	***	-0,000660 4	-0,000804 7			325,59
G	66	-1,858	3,833930	0,035681	.	0,001423			379,06
H	415	-0,8465	3,955642	***	-0,006452	0,005935	***		2.003,4
I	775	-0,6571	4,9489861	***	0,0141346	***	0,0033284	***	3.655,3
J	645	-0,9578	4,1438331	***	0,0294352	***	0,0035661	***	3.345,5

Significancia estadística: 0'***' 0,0001'***' 0,01'*' 0,05'.'0,1 ' ' 1

Elaboración de los Mapas de Variables Biofísicas a partir de modelización y datos LiDAR aéreos

Las variables objetivo calculadas a escala de parcela se utiliza para entrenar modelos predictivos con los datos del vuelo LiDAR de 2018. Una vez obtenido el modelo final para cada variable, se realiza la predicción continua sobre la superficie forestal arbolada, delimitada por los estratos de inventario del INF.

No obstante, para dos de las Variables Biofísicas se ha empleado metodología diferente. La cartografía de Fracción de Cobertura Cubierta (FCC) se genera directamente a partir de los datos LiDAR (sin modelo predictivo). Para el CMO, se ha elaborado un modelo predictivo en base a los datos de altitud, de BAT y de carbono en el horizonte orgánico de las comarcas catalanas vecinas que se ha aplicado después para predecir el valor de CMO en los bosques de Andorra.

El vuelo LiDAR de 2018 se hizo entre el 4 y el 5 de octubre de 2018, con una altitud media de 4.750 m y una densidad de puntos de 1 punto/m². Estos datos se encuentran disponibles en el Geoportal IDE Andorra en formato LAZ. Se ha considerado como adecuada una resolución de 20x20 m para los cálculos estadísticos de la nube de puntos y los mapas resultantes.

El procesamiento de los datos LiDAR se divide en las siguientes fases:

1. Generar el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), en formato dtm, según la clasificación previa de los puntos de los archivos LAS clasificados como tierra.

Para el mapa de FCC se ha generado un MDE específico, seleccionando los puntos considerados de menor cota en relación a los puntos vecinos independientemente de su clasificación por categorías.

1. Calcular los diferentes estadísticos de la nube de puntos, utilizando aquellos clasificados como tierra y vegetación. Se ha fijado el *heightbreaky* el *mintha* 2 m.

En el caso de la FCC, dado que es una variable que se puede calcular directamente a partir de determinadas métricas de la nube de puntos pero es sensible a la densidad total de puntos por unidad de superficie, las métricas necesarias se calculan con todos los puntos, sin utilizar la clasificación por tipo. Además, el



heightbreakse fija a 3 m y el *mintha* 0,2 m. Se calcula como

$$FCC = (1RAHB/T1R) \cdot 100$$

1. Generar rásteres con las diferentes métricas de la nube de puntos. Sólo se han considerado métricas que consideran la densidad de puntos por unidad de superficie de manera relativa, no dependientes de la densidad total.
2. Extraer nube de puntos y calcular métricas en la superficie de las parcelas de inventario. Al disponerse de la localización de las parcelas con GPS submétrico y de su radio de inventario, se puede extraer exactamente la nube de puntos que representa cada parcela para poder calcular los estadísticos y relacionarlos con los datos de inventario.

Todas estas métricas georeferenciadas se recortan según la capa de estratos de inventario. La capa final, representando todos los estratos, tiene un total de 455.703 píxeles para las 18.226,97 ha de superficie forestal arbolada.

Para la predicción continua de las variables calculadas a escala de parcela, se entrenaron modelos predictivos de tipo *random forests* para cada variable (excepto FCC y CMO). Este algoritmo de aprendizaje automático combina la salida de múltiples árboles de decisión para obtener un único resultado. Se disponía de 24 métricas LiDAR calculadas para todo el territorio y las parcelas INF, aunque finalmente se seleccionaron 13 métricas para el entrenamiento de los modelos, basándose en un análisis de correlaciones. Para generar cada modelo, la muestra de datos disponible de las 194 parcelas se separa de manera aleatoria en una proporción 70/30 para crear los conjuntos de datos de entrenamiento y de validación. Cada variable tiene un modelo propio, por lo que el conjunto de parcelas de entrenamiento y de validación es diferente en cada caso.

Los hiperparámetros más importantes en un modelo *random forests* son los que controlan el crecimiento de los árboles de regresión y el número de árboles y predictores incluidos. Primero se ajusta un modelo con hiperparámetros estándar, luego se optimizan mediante estrategias de validación cruzada y *Out-of-bag error*. La optimización no se realiza de manera secuencial, sino mediante un proceso de *grid search* para analizar diversas combinaciones. Una vez obtenidos los mejores hiperparámetros, se reentrena el modelo y se valora la capacidad de predicción con el RMSE (*root mean square error*).

Con la predicción sobre los datos de partida, tanto del conjunto de entrenamiento como del de validación, se valora el comportamiento de la propia predicción, también si existen sesgos sistemáticos u otros efectos no deseados. Como los datos que se emplean en este proceso son de diversa naturaleza y han pasado por varias fases de procesado o elaboración, es previsible que el resultado de la predicción por modelización presente un tipo y una magnitud de error que requiera más atención para intentar corregirlo. Por ejemplo, pueden ser fuentes de error para el proceso la diferencia de fechas entre el vuelo LiDAR (2018) y la toma de datos en bosque (2022), así como el hecho de que hay variables calculadas para las parcelas con el uso de ecuaciones alométricas elaboradas fuera del ámbito de estudio.

Con la comparación entre la predicción de las variables con los modelos y los datos calculados para las parcelas se obtienen los *residuos* de la predicción. Si estos residuos presentan una forma heterocedástica, sin varianza constante, y también se observa una subestimación/sobreestimación cuando se confronta la predicción vs. observación, a la predicción de los modelos se les aplica un factor de



corrección, con el objetivo de mejorar la representatividad de todo el rango de valores de la predicción final y la elaboración de los respectivos Mapas de Variables Biofísicas. Este factor de corrección se obtiene de la modelización del error de la predicción inicial, de manera que por cada punto donde se predice un valor (parcela o píxel) se calcula también un error previsto y éste se incorpora a la predicción con el fin de corregirla. El factor de corrección considerado en esta ocasión tiene la forma

$$fc = a \cdot PRED + b$$

La aplicación de estos factores de corrección construidos en base a los residuos sobre la muestra de datos verdad-terreno puede considerarse un *sobreajuste (overfitting)* a los datos del estudio, y limita el uso de los modelos a ser aplicados en el mismo ámbito y el propio conjunto de datos con los que se han elaborado y dificulta la interpretación del propio modelo como herramienta explicativa de la observación realizada (modelo de regresión). En todo caso, es adecuado para el uso de predicción que se realiza en la generación de los Mapas de Variables Biofísicas a escala de paisaje.

Una vez se dispone del modelo final entrenado, con factor de corrección incorporado, se cuantifica el error de predicción, se realiza una predicción de cada variable en cada píxel y se genera el mapa para toda la superficie forestal arbolada de Andorra.

4. Resultados

Tras el replanteo de todas las parcelas de inventario del INF1-AND en 2022 se dispone de una red de 194 parcelas (93,95 ha por parcela) distribuidas por los diferentes estratos de inventario según se detalla en la Tabla 7, donde se muestra también la distribución teórica de parcelas por estrato. La Figura 6 muestra la distribución geográfica de la red replantada. La Tabla 8 muestra las características de los datos medidos, que contienen 9.137 árboles vivos de 25 especies diferentes, 446 matorrales con datos estimados de 30 especies diferentes, 764 árboles muertos en pie de 15 especies diferentes y 302 árboles muertos en tierra de 14 especies diferentes.

Tabla 7. Representatividad de los diferentes estratos forestales arbolados y las parcelas de inventario correspondientes finalmente replantadas en el primer INF1-AND.

Estrato de inventario	Código	Superficie	Parcelas teóricas		Parcelas finales INF1		
			%	n	%	n	%
Pinares de pino negro mesófilos	PNM	4.212,54	23,1%	45	23,3%	43	22,2%
Pinares de pino albar xerófilos y repoblaciones	PRX	3.302,33	18,1%	34	17,6%	34	17,5%
Bosques de protección y defensa	BPD	3.266,10	17,9%	33	17,1%	35	18,0%
Pinares de pino albar mesófilos	PRM	2.663,02	14,6%	28	14,5%	30	15,5%

Pinares de pino negro xerófilos y repoblaciones	PNX	2.328,89	12,8%	27	14,0%	30	13,9%
Abetales y Pinares con abetos	AVE	641,91	3,5%	7	3,6%	6	3,1%
Bosques mixtos, fresnedas, abedulares y choperas	BMF	614,43	3,4%	6	3,1%	6	3,1%
Carrascales	CAR	324,47	1,8%	3	1,6%	3	1,5%
Robledales de roble pubescente	RMR	249,60	1,4%	3	1,6%	3	1,5%
Avellanares	COR	160,67	0,9%	2	1,0%	2	1,0%
Bosques mixtos de caducifolios y coníferas	BMC	153,10	0,8%	2	1,0%	1	0,5%
Bosques mixtos de carrasca y robles y pino albar	BMQ	124,59	0,7%	1	0,5%	2	1,0%
Vegetación de claros y matorrales	VCB	85,51	0,5%	1	0,5%	1	0,5%
Robledales de roble albar	RFG	71,85	0,4%	1	0,5%	1	0,5%
Bosques y matorrales de ribera	BBR	27,97	0,2%	0,0%		0,0%	
18.226,97	193			194			

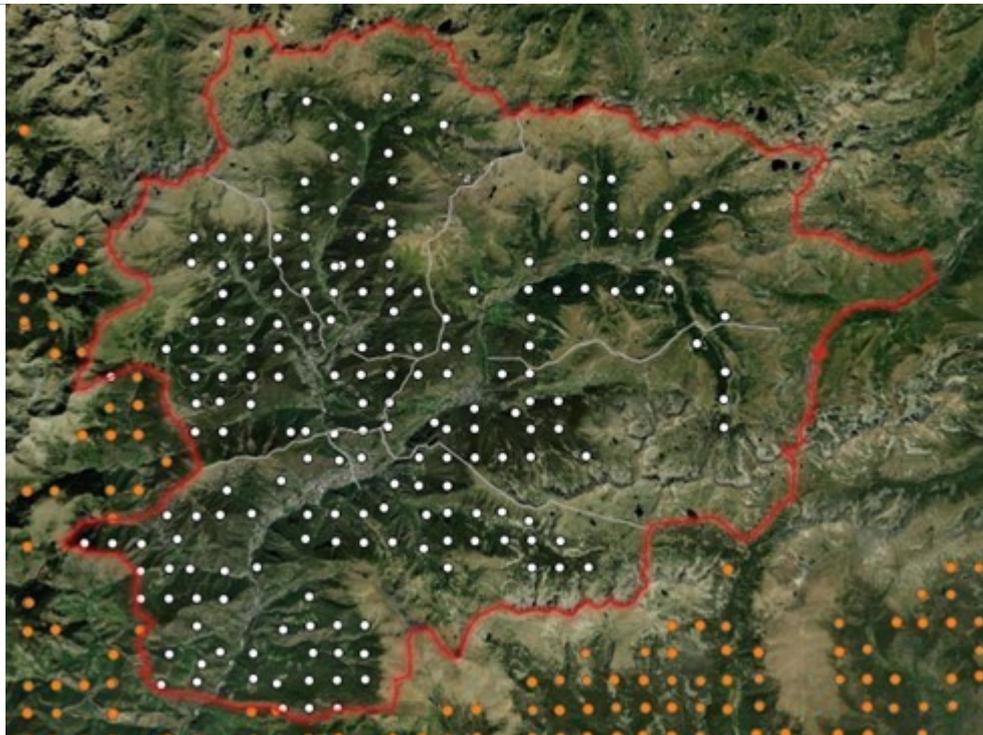


Figura 6. Distribución final de la red de parcelas permanentes replanteada para el



INF Andorra (puntos blancos), con identificación de las parcelas del IFN de España (puntos naranjas).

Tabla 8. Estadísticos descriptivos de los datos procedentes de las parcelas del INF1-AND.

Variable	N datos	Mínima	Media	Máxima	Desviación estándar	Histograma	
Aspecto	9.137	1	1,02	2	0,146		
Dn	cm	9.137	7,5	21,2	82,0	10,60	
Ht	m	1.142	2,2	12,0	32,7	4,08	
Hm	cm	446	10,0	94,4	500,0	82,70	
Rm	%	446	12,5	28,5	87,5	24,50	
Dnm	cm	764	7,5	17,7	66,0	9,34	
Htm	m	187	0,8	5,2	13,6	3,26	
Dcm	cm	302	17,5	23,6	57,5	6,77	
Ltm	cm	302	50	483	2000	336	

Parámetros silvodasométricos

Los resultados, por estratos, de los principales parámetros silvo-dasométricos, se muestran en la Tabla 9 y la Tabla 10.

Tabla 9. Datos descriptivos respecto a Área Basimétrica, Diámetro medio cuadrático y Altura media para el total de los bosques de Andorra y por estratos. * estrato sin parcelas de inventario.

Estrato	Área Basimétrica			Diámetro medio cuadrático			Altura media		
	m ²	/ha	cm	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima
PNM	13,8	39,6	8,7	11,0	13,5	66,3	13,4	24,0	32,6
PRX	8,8	41,0	8,7	10,5	14,5	71,8	14,0	22,8	38,1
BPD	6,1	39,0	8,8	10,9	13,3	68,2	16,0	25,6	36,6
PRM	19,4	43,2	9,1	10,4	12,1	88,9	16,3	25,6	38,1
PNX	21,9	45,5	10,0	13,4	16,4	68,3	17,7	26,0	34,9
AVE	13,5	35,9	9,7	10,6	11,4	50,5	14,5	21,0	25,8
BMF	36,3	52,2	10,6	11,8	13,0	62,1	18,2	25,3	33,6

MT 2: GOBERNANZA E INTEGRACIÓN SOCIAL



CAR	10,8	21,6	4,6	7,3	9,1	39,1	10,7	18,5	24,0
RMR	12,8	23,4	5,4	7,8	11,0	33,8	11,9	19,0	31,5
COR	14,9	18,0	8,2	8,3	8,3	21,1	14,2	15,8	17,3
BMC	13,7	13,7	9,4	9,4	9,4	13,7	19,6	19,6	19,6
BMQ	12,0	21,2	6,1	6,4	6,6	30,4	14,3	14,6	14,9
VCB	29,0	29,0	8,8	8,8	8,8	29,0	16,3	16,3	16,3
RFG	32,7	32,7	10,4	10,4	10,4	32,7	26,3	26,3	26,3
BBR*									
total	6,1	40,2	4,6	10,9	16,4	88,9	10,7	24,1	38,1

*Tabla 10. Datos descriptivos respecto a Densidad de pies vivos, Volumen con Corteza e Incremento Anual de Volumen con Corteza para el total de los bosques de Andorra y por estratos. * estrato sin parcelas de inventario.*

Estrato	Densidad de pies vivos		Volumen con Corteza		Incremento anual Volumen				
	pies/ha	m ³	/ha	m ³	/ha·a				
	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima
PNM	310	954	2653	78,9	252,2	398,5	1,8	6,2	15,1
PRX	376	1097	2520	67,2	258,2	474,2	2,4	7,1	15,6
BPD	78	815	1813	34,1	229,1	393,4	0,8	6,4	11,9
PRM	385	920	2100	114,7	245,7	469,3	2,8	5,6	10,5
PNX	279	934	1813	146,7	316,1	490,3	3,7	8,1	12,4
AVE	622	1097	2188	79,1	246,6	443,9	3,4	7,7	19,0
BMF	410	1177	2056	209,8	389,3	536,5	3,5	11,3	21,8
CAR	239	1008	1636	53,9	103,0	195,4	1,1	2,5	5,0
RMR	433	1141	2105	54,0	93,8	141,9	1,3	2,8	5,0
COR	633	980	1326	84,2	91,2	98,1	3,7	5,0	6,3
BMC	455	455	455	82,3	82,3	82,3	2,2	2,2	2,2
BMQ	685	1293	1901	35,7	85,7	135,7	3,2	3,6	4,0
VCB	1393	1393	1393	199,9	199,9	199,9	6,4	6,4	6,4



RFG	603	603	603	182,7	182,7	182,7	3,9	3,9	3,9
BBR*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
total	78	964	2653	34,1	251,6	536,5	0,8	6,6	21,8

Carbono almacenado y capacidad de fijación anual

Los resultados, por estratos, de la estimación del carbono almacenado por fracciones y de la capacidad de fijación anual, se muestran en la Tabla 11 (medias), en la Tabla 12 (totales) y la (incrementos). La Figura 7 muestra los histogramas de las variables.

Tabla 11. Resultados medios del stock de carbono por cada una de las fracciones calculadas de los bosques de Andorra, total y por estratos, además de la capacidad de fijación del arbolado.

Estrato	Carbono almacenado (t/ha)	Capacidad de fijación anual (t/ha)
PNM	635,241	1,0
PRX	623,241	1,0
BP	634,131	1,1
PRM	632,251	1,3
PNX	744,361	0,9
AVE	944,881	1,8
BMF	633,201	1,3



C A R	3 6 , , 9	2 3 , , 9	5 , , 1	0 , , 2	1 0 , , 5	0 , , 8		0,4
R M R	4 9 , 2	2 9 , 3	6 , 9	0 , 3	1 6 , 7	9 0 , 9		0,4
C O R	2 8 , 7	1 5 , 3	2 , , 0	1 , , 4	2 1 , 6	1 1 , 5		0,8
B M C	2 5 , 8	9 1 , 5	1 , , 0	0 , , 0	1 1 , 6	0 1 , 7		0,4
B M Q	3 7 , 9	2 8 , 1	2 , , 2	0 , , 4	0 0 , 7	1 1 , 1		0,6
V C B	4 7 , 7	2 8 , 8	3 , , 1	0 , , 0	1 1 , 7	2 , , 0		1,0
R F G	7 6 , 9	2 8 , 9	7 , , 8	0 , , 1	0 0 , 2	1 1 , 2		0,6
B B R					1 1 , 1			-
t o t a l	6 9 , 9	3 3 , 0	4 , , 3	2 , , 4	4 4 , 8	1 2 , 6		1,1

Tabla 12. Resultados totales del stock de carbono por cada una de las fracciones calculadas de los bosques de Andorra, en total y por estratos. * estrato calculado en base a la media global.

Estrato	Carbono aéreo total (arbóreo)	Carbono subterráneo total (arbóreo)	Carbono aéreo total (arbustivo)	Carbono de la madera muerta en pie	Carbono de la madera muerta en el suelo	Carbono de la materia orgánica del suelo	Total Stock de Carbono estimado
t	t	t	t	t	t	t	t
PNM	287.874	155.384	24.011	11.373	19.523	56.884	535.342
PRX	225.540	104.816	14.497	4.230	10.457	55.373	414.913
BPD	217.493	81.941	11.464	8.606	16.153	46.063	381.720
PRM	231.112	80.394	7.429	5.316	13.953	46.706	384.910
PNX	163.386	99.063	11.052	7.681	15.186	30.968	327.336
AVE	64.073	27.292	2.998	5.332	5.278	8.992	113.965
BMF	39.385	20.092	2.093	1.244	583	7.522	70.919
CAR	11.984	7.755	1.655	75	149	3.366	24.984
RMR	12.280	7.321	1.732	69	4.161	2.475	28.038



COR	4.619	2.466	368	153	393	1.860	9.859
BMC	3.950	1.500	1.764	3	1.777		8.994
BMQ	4.722	3.495	272	46	1.338		9.873
VCB	4.079	2.463	263	1.004		7.809	
RFG	5.525	2.076	559	6	735		8.901
BBR*	1.956	924	121	68	134	310	3.513
total	1.274.620	601.913	80.278	44.198	87.164	265.489	2.353.546

*Tabla 13. Resultados totales de la fijación anual de carbono de los bosques de Andorra, en total y por estratos. * estrato calculado en base a la media global.*

Estrato	Incremento de	carbono aéreo total	(árbol eo)	Incremento de	carbono subterráneo total	(árbol eo)	Fijación de carbono anual estimada	en la parte arbolada
t	t				t			
PNM	8.004	4.203			12.207			
PRX	7.171	3.755			10.926			
BPD	6.350	3.353			9.703			
PRM	6.638	3.482			10.120			
PNX	3.998	2.119			6.117			
AVE	2.225	1.166			3.391			
BMF	1.434	768			2.202			
CAR	249	119			368			
RMR	208	108			316			
COR	241	129			370			
BMC	107	61			168			
BMQ	137	69			206			
VCB	171	86			257			
RFG	86	43			129			
BBR*	56	30			86			
total	36.764	19.326			56.090			

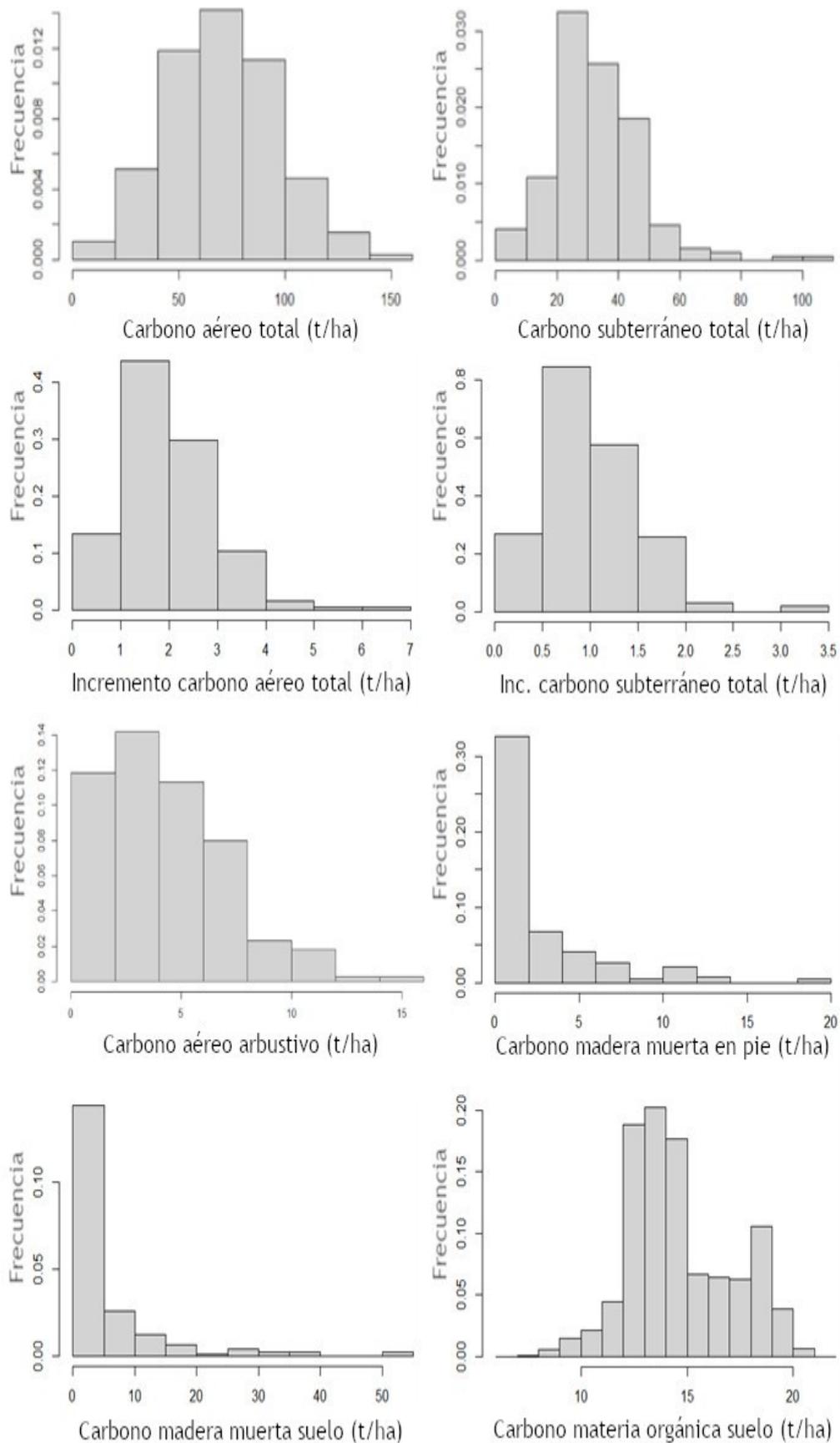


Figura 7. Histogramas de los resultados obtenidos en las 194 parcelas respecto a CAT, CST, ICAT, ICST, Carb, CMM (en pie y en el suelo), más el histograma de los

455.703 píxeles de 20x20 m para el CMO.

Entrenamiento de los modelos predictivos sobre datos LiDAR

Los modelos *random forests* para la predicción de las Variables Biofísicas del arbolado se entrenaron con la selección de 13 métricas LiDAR de la Figura 8, que muestra el gráfico de correlaciones.

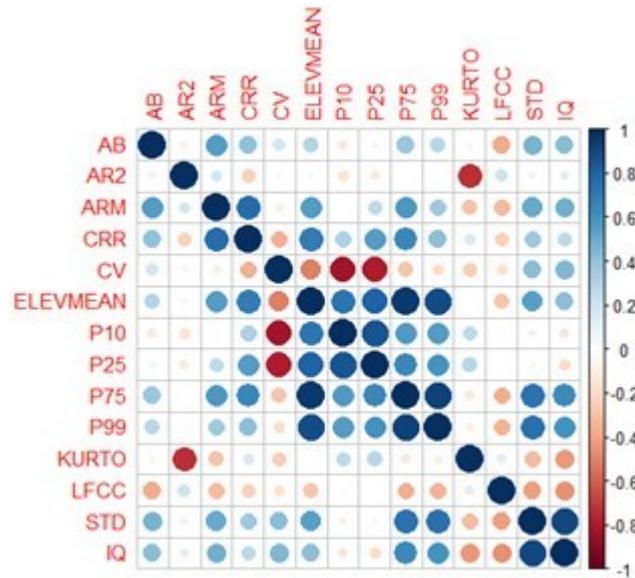


Figura 8. Gráficos de correlaciones entre las 13 métricas LiDAR empleadas para el entrenamiento de los modelos. En esta visualización se incluye la variable Área Basimétrica (AB, primera fila) como variable respuesta, a modo de ejemplo.

La Tabla 14 recoge los resultados de la optimización de los hiperparámetros con *grid search* en base al *out-of-bag error* y en base al error por validación cruzada sobre los datos de validación para cada variable. Los valores de error cuadrático medio de la raíz (RMSE) sobre los datos de validación, sobre los datos de entrenamiento y sobre el total de las 194 observaciones disponibles en cada variable se muestran en la Tabla 15. Los predictores empleados (métricas LiDAR) se ordenan según la importancia que tienen en la predicción de la variable respuesta, estimada por permutación. La Tabla 16 presenta la clasificación para cada variable y la proporción entre ellas.

En la comparación de los datos observados vs. predichos en las parcelas con los *random forests* se observa un residuo heteroceleástico y un sesgo de sobrestimación/subestimación a lo largo del rango observado de cada variable (Figura 9). Por ello, se han generado los factores de corrección con la forma

$$fc = a \cdot PRED + b$$

Tabla 14. Resultado de la optimización de los hiperparámetros por *grid search* basado en *out-of-bag error* y en el error por validación cruzada para el modelo de cada variable.

Variable	N árboles	N predictores por nodo	Profundidad máxima	Estimación de error	
AB	Out-of-bag error	5000	5	3	10,9



Validación cruzada	50	5	3	10,6	
Dg	Out-of-bag error	1000	3	3	4,64
Validación cruzada	100	3	3	4,63	
Hm	Out-of-bag error	100	3	3	1,41
Validación cruzada	500	3	3	1,36	
N	Out-of-bag error	5000	13	3	386
Validación cruzada	500	7	3	380	
VAE	Out-of-bag error	100	3	3	75,6
Validación cruzada	50	5	10	73,8	
IAVC	Out-of-bag error	100	5	3	2,21
Validación cruzada	1000	7	20	2,18	
BAT	Out-of-bag error	5000	5	3	38,9
Validación cruzada	50	5	3	37,5	
BST	Out-of-bag error	500	3	3	25,9
Validación cruzada	5000	3	3	25,2	
CAT	Out-of-bag error	100	3	10	19,4
Validación cruzada	5000	5	3	19,0	
CST	Out-of-bag error	500	3	3	12,9
Validación cruzada	5000	3	3	12,6	
ICAT	Out-of-bag error	100	5	3	0,675
Validación cruzada	100	3	10	0,684	
ICST	Out-of-bag error	100	3	10	0,355
Validación cruzada	500	7	3	0,353	

Tabla 15. Resultados de root mean square error sobre los tres conjuntos de datos para cada variable, en absoluto y en relativo sobre el valor medio observado en las parcelas INF.



RMSE	AB	Dg	Hm	N	VAE	IAVC	BAT	BST	CAT	CST	ICAT	ICST												
m ²		/ha	cm	m	pies/ha	m ³		/ha	m ³	/ha·a	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha·a						t/ha·a			
Validación	12,1	30%	5,72	24%	1,22	11%	448	46%	80,2	32%	3,27	50%	40,8	29%	30,8	47%	20,4	29%	15,4	47%	1,010	50%	0,531	50%
Entrenamiento	4,89	12%	2,09	9%	0,633	6%	177	18%	33,6	13%	0,991	15%	17,4	12%	12,1	18%	8,67	12%	6,04	18%	0,303	15%	0,161	15%
Muestra total	7,76	18%	3,58	15%	0,851	8%	286	30%	52,1	21%	1,97	30%	26,6	19%	19,6	30%	13,3	19%	9,84	30%	0,607	30%	0,320	30%



Tabla 16. Métricas LiDAR clasificadas por importancia como predictoras para cada variable (estimación por permutación).

MT 2: GOBERNANZA E INTEGRACIÓN SOCIAL



ELEVMEAN	10	7	3	7	10	5	6	4	7	6	4	4
STD	2	1	1	4	3	3	2	2	2	2	3	3
CV	8	5	7	11	8	12	9	3	10	3	12	12
IQ	3	6	5	6	2	4	3	1	3	1	5	5
KURTO	11	10	11	10	11	9	10	12	12	12	9	9
P10	7	9	9	12	7	11	8	6	6	4	11	11
P25	9	8	6	9	9	10	12	5	11	5	10	10
P75	5	3	2	5	5	6	5	7	5	7	6	6
P99	12	2	4	1	12	7	11	11	9	11	7	8
AR2	13	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
ARM	1	13	8	2	1	1	1	8	1	8	1	1
CRR	4	4	10	3	4	2	4	10	4	10	2	2
LFCC	6	11	12	8	6	8	7	9	8	9	8	7

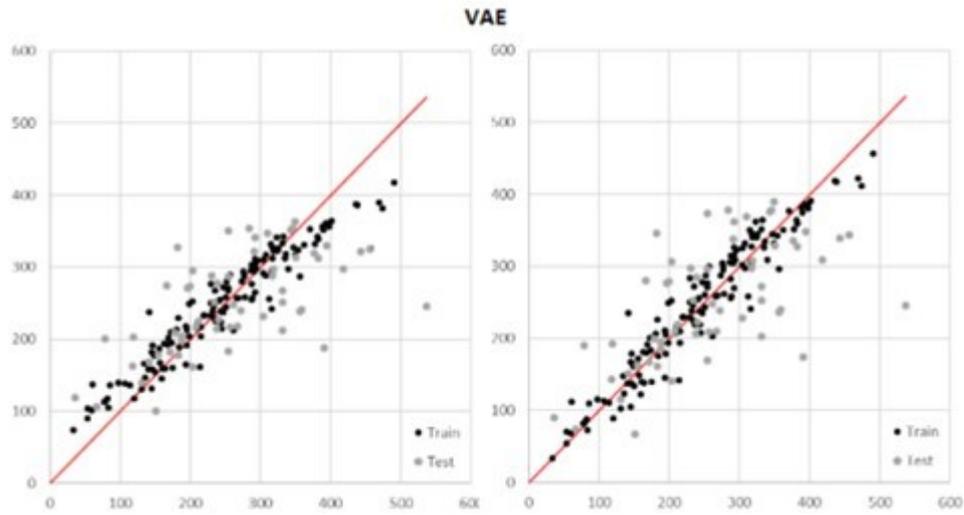


Figura 9. Gráficos de dispersión de valores observados vs. predichos antes (izqda.) y después (dcha.) de aplicar el factor de corrección, para la variable VAE (m^3/ha).

Tabla 17. Coeficientes para el factor de corrección a aplicar a la predicción de cada variable.



AB	Dg	Hm	N	VAE	IAVC	BAT	BST	CAT	CST	ICAT	ICST	
a	0,2338	0,4168	0,2398	0,3918	0,2285	0,2820	0,2116	0,4096	0,2123	0,4065	0,2766	0,2699
b	-9,3988	-10,0416	-2,5823	-384,0118	-56,6197	-1,8114	-29,1645	-27,3945	-14,6358	-13,6156	-0,5399	-0,2790



Tabla 18. Resultados de root mean square error de los modelos finales con el factor de corrección aplicado sobre los tres conjuntos de datos para cada variable, en absoluto y en relativo sobre el valor medio observado en las parcelas INF.



RMSE	AB	Dg	Hm	N	VAE	IAVC	BAT	BST	CAT	CST	ICAT	ICST														
m ²		/ha	cm	m	pies/ha	m ³		/ha	m ³	/ha·a	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha·a						t/ha·a					
Validación	12,61	31%	5,82	24%	1,23	11%	456,77	47%	82,39	33%	3,26	49%	42,36	30%	32,19	49%	21,15	30%	16,13	49%	1,01	50%	0,53	50%		
Entrenamiento	4,15	10%	1,56	6%	0,55	5%	128,56	13%	28,64	11%	0,80	12%	15,00	11%	9,28	14%	7,48	11%	4,67	14%	0,25	12%	0,13	12%		
Muestra total	7,72	19%	3,44	14%	0,81	7%	271,96	28%	51,03	20%	1,91	29%	26,35	19%	19,24	29%	13,15	19%	9,65	29%	0,59	29%	0,31	29%		



Distribución espacial de las variables biofísicas

Los Mapas de Variables Biofísicas se han generado en formato ráster con una resolución de 20x20 m para las variables AB, Dg, Hm, N, VAE, IAVC, BAT, BST, CAT, CST, CMO ICAT y ICST. La Figura 10 muestra, a modo de ejemplo, el mapa generado para el VAE, junto con su histograma. La Tabla 19 recoge el valor medio observado en el ráster de cada una de las variables, junto con la observada en los datos de las parcelas INF, mientras que la Tabla 20 muestra el resultado para cada estrato de inventario del INF.



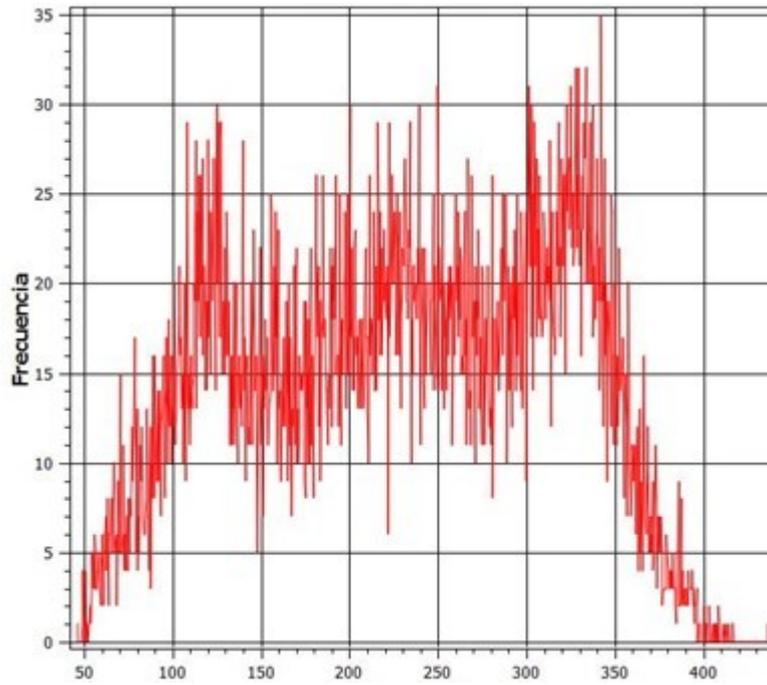


Figura 10. Representación e histograma de los valores de VAE de los píxeles que cubren la superficie forestal arbolada de Andorra.

Tabla 19. Media de los valores observados para cada variable en los rásteres generados y en los datos INF.



AB	Dg	FCC	Hm	N	VAE	IAVC	BAT	BST	CAT	CST	CMO	ICAT	ICST						
m ²		/ha	cm	%	m	pies/ha	m ³		/ha	m ³		/ha·a	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha·a	t/ha·	
μ ráster	37,1	23,9	64	10,7	900	228,2	5,9	128,2	61,3	64,1	30,7	14,63	1,8					1,0	
μ INF	40,2	24,1	-	10,9	964	251,6	6,6	139,8	66,0	69,9	33,0	-	2,0					1,1	



Tabla 20. Media de los valores observados para cada variable en los rásteres generados por cada estado de inventario INF.

MT 2: GOBERNANZA E INTEGRACIÓN SOCIAL



AB	Dg	Hm	N	VAE	IAVC	BAT	BST	CAT	CST	ICAT	ICST						
m	²	/ha	cm	m	pies/ha	m	³	/ha	m	³	/ha-a	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha-a	t/ha-a
PNM	35,7	23,8	10,5	852	217,2	5,3	120,3	65,8	60,2	32,9	1,6						0,9
PRX	33,1	23,4	10,3	822	199,7	5,0	110,7	58,9	55,4	29,5	1,5						0,8
BPD	37,5	24,2	10,8	906	230,7	6,1	131,7	63,3	65,9	31,7	1,9						1,0
PRM	44,0	25,8	11,6	936	278,5	7,2	158,8	69,8	79,4	35,0	2,2						1,2
PNX	34,9	24,1	10,6	819	213,8	5,4	120,1	57,5	60,1	28,8	1,6						0,9
AVE	35,8	22,3	10,2	1024	216,5	6,2	125,4	55,2	62,7	27,6	1,9						1,0
BMF	39,7	24,1	10,9	969	245,6	6,6	138,7	60,4	69,3	30,2	2,0						1,1
CAR	43,9	25,1	11,5	1006	277,5	7,4	156,5	65,6	78,2	32,9	2,3						1,2
RMR	30,2	22,1	9,9	907	178,1	5,0	102,5	50,6	51,3	25,4	1,5						0,8
COR	25,4	18,2	8,6	1075	143,9	4,2	83,9	39,2	41,9	19,6	1,3						0,7
BMC	35,9	22,6	10,4	1000	218,6	6,1	126,1	55,8	63,0	27,9	1,9						1,0
BMQ	29,8	21,3	9,7	927	175,6	5,0	100,5	47,2	50,3	23,7	1,5						0,8
VCB	26,1	20,8	9,3	867	151,6	4,2	86,2	43,1	43,2	21,6	1,3						0,7
RFG	26,5	18,8	8,9	1064	151,3	4,6	87,5	41,1	43,8	20,6	1,4						0,7
BBR*	36,2	24,3	10,9	895	223,5	6,0	129,2	66,7	64,9	33,4	1,8						1,0

5. Discusión

El diseño y la implementación del Inventario Nacional Forestal de Andorra ha permitido poner al día a este país en relación con las regiones pirenaicas de España y Francia en cuanto a datos forestales, completando así la disponibilidad de información del macizo. La metodología de inventario incorpora algunas innovaciones respecto a las zonas vecinas, aprovechando la oportunidad de establecer la red desde el inicio. Además, se han incorporado nuevas tecnologías, más bien como un apunte de nueva investigación a realizar sobre los métodos, como es el caso de la toma de datos LiDAR mediante dron sobre algunas parcelas de inventario (Figura 11), que queda pendiente de realizar próximamente.

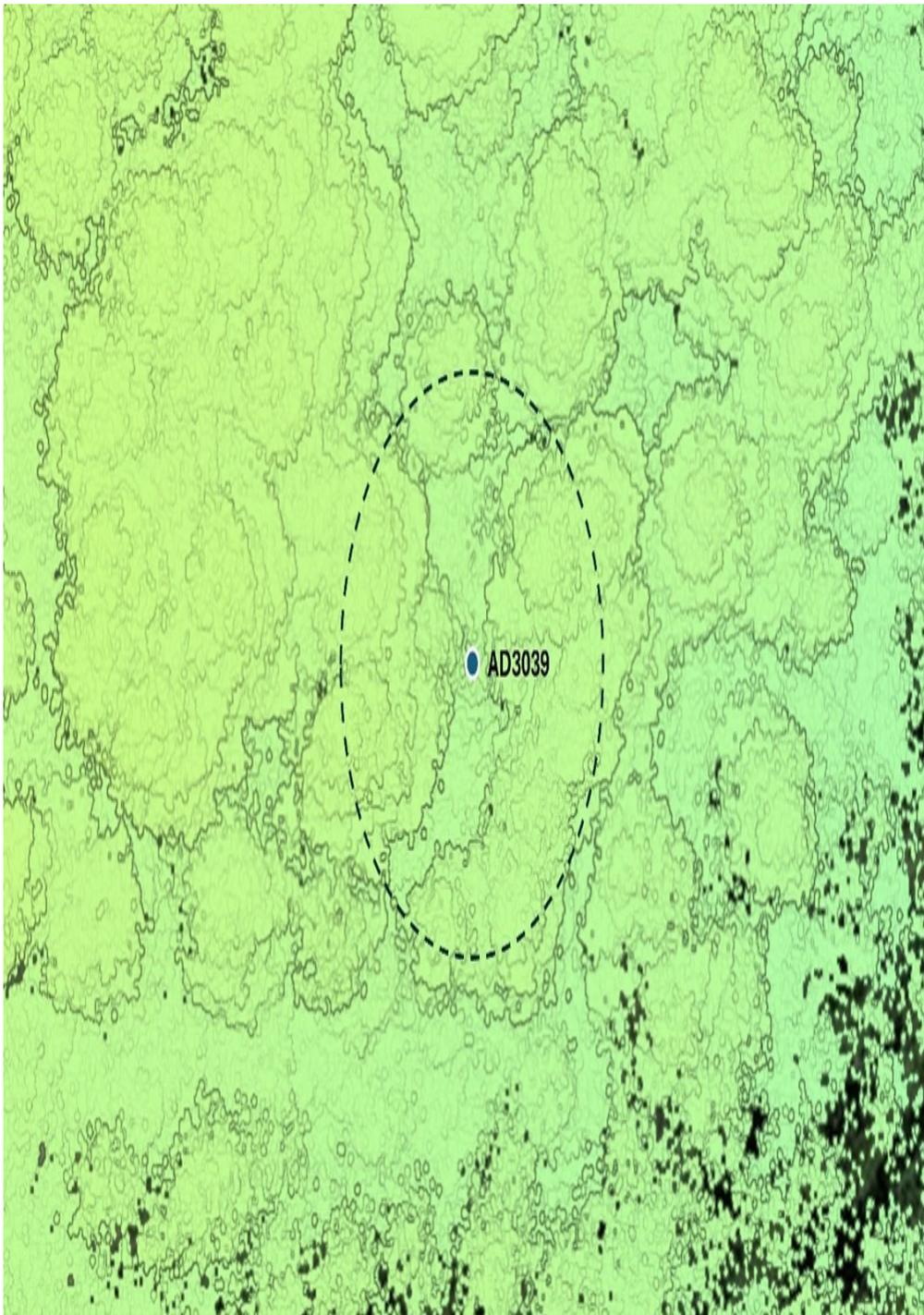




Figura 11. Representación de la nube de puntos LiDAR-UAV obtenida sobre una parcela de inventario del INF1-AND.

Esta primera medida, con sus respectivos primeros resultados, son el inicio del monitoreo a largo plazo de los bosques andorranos. En futuras campañas de inventario se podrán incorporar mejoras, si se estima necesario, pero siempre con la base de mantener el monitoreo iniciado. Queda patente la necesidad de comprobar el ajuste de las alométricas empleadas en diferentes pasos metodológicos a las condiciones de los bosques y árboles andorranos, procediendo a generar ecuaciones propias si se estima necesario. De esta manera, futuras medidas del INF mejorarán su ajuste a la realidad, además de documentar la evolución de los bosques.

La estimación del carbono almacenado en los bosques y su capacidad de fijación anual presenta varias dificultades, que pueden ser resueltas con herramientas y metodologías específicas, aunque siempre con un grado de incertidumbre. El carbono en los bosques está presente en varias fracciones, como la parte arbolada, arbustiva, madera muerta, y el suelo orgánico y mineral. Cada fracción tiene características propias que condicionan su estudio.

La parte arbolada, especialmente la biomasa aérea, ha sido la más estudiada debido a su visibilidad y facilidad de inventario. Los arbustos y la madera muerta también han sido objeto de estudio, especialmente en ecosistemas donde son abundantes. El carbono en el suelo orgánico y mineral es la fracción más desconocida, pero su capacidad de almacenamiento es destacada, incluso superior a la de la vegetación aérea. Por ejemplo, RODRÍGUEZ MARTÍN et al. (2016) cifra el carbono del suelo mineral de los sistemas forestales españoles en un 52% del total almacenado. Con los datos disponibles del INF1-AND no ha sido posible calcular/estimar el carbono almacenado en la parte subterránea de la vegetación arbustiva ni su capacidad de fijación anual.

La estimación de carbono realizada es una primera aproximación al estado actual de los bosques de Andorra basada en datos tomados sobre el terreno. El carbono total almacenado se estima en una cantidad de 2.353.546 toneladas, aún sin contar el stock del suelo mineral, con una capacidad de fijación estimada en 56.090 t/año (unas 205.850 toneladas/año de CO₂ atmosférico equivalente) sólo en la fracción arbolada viva. Las siguientes medidas de las parcelas del INF ahora establecidas aportarán información más cuidadosa sobre las tasas anuales de fijación de carbono atmosférico.

Los métodos empleados en este caso presentan algunos puntos que pueden aportar incertidumbre a los resultados, aunque el diseño del INF haya tenido en cuenta explícitamente este uso de los datos. En general, estos puntos débiles se pueden diferenciar entre pasos metodológicos propios de los datos de base y otros derivados de la aplicación de herramientas provenientes de estudios u otros datos de ámbitos diferentes en la zona de estudio. Además, la falta de datos propios respecto al suelo ha condicionado la estimación del carbono del horizonte orgánico del suelo y ha imposibilitado la estimación del carbono del suelo mineral. Todos estos puntos pueden ser mejorados si los datos de base se amplían o complementan con muestreos propios o con futuras remedidas de las parcelas del INF.

Con todo, los resultados obtenidos aportan información valiosa sobre el estado del



carbono en los bosques de Andorra. A modo orientativo, la Tabla 21 muestra los porcentajes del stock de carbono de las fracciones estudiadas para Andorra comparadas con lo estimado para los sistemas forestales de España. Al no incluirse el suelo mineral, la parte arbolada es la que más carbono representa, manteniendo similitudes en todas las fracciones. Las diferencias en la parte arbustiva y en la madera muerta pueden responder a las diferencias propias de los sistemas estudiados, en cuanto a la estructura forestal (más abundancia de matorrales en sistemas mediterráneos, más abundancia de madera muerta en bosques de montaña más desarrollados) y en la ecología (clima, fisiografía).

Tabla 21. Porcentajes del stock de carbono estimados para los sistemas forestales de España y los bosques de Andorra. Los datos de España provienen de una recopilación de RUIZ-PEINADO (ICIFOR-INIA, CSIC) a partir de: MONTERO et al. (2020), ALBERDI et al. (2020) y LÓPEZ-SENSEPLEDA et al. (2021).

Fracción	España	Andorra
Arbolado	82,6%	79,7%
Arbustivo	5,2%	3,4%
Madera muerta	1,3%	5,6%
Horizonte orgánico	10,9%	11,3%

Paralelamente, la cobertura de Andorra con un vuelo LiDAR de 2018, aunque de carácter generalista y hecho 4 años antes que el INF, ha permitido una primera espacialización de la información puntual del INF con el fin de generar los primeros Mapas de Variables Biofísicas de Andorra. Estos mapas ofrecen la visualización en continuo de las variables a escala de paisaje, con el uso potencial más adecuado como base de zonificación y diferenciación por comparación entre zonas, y no tanto como identificación de valores absolutos en puntos discretos. Futuras campañas de obtención de datos, tanto LiDAR como inventarios de las parcelas INF, permitirán elaborar nuevas versiones de los Mapas e incluso estudiar la evolución de la cubierta arbolada.

Los datos LiDAR de 2018 disponibles han sido adecuados en general para realizar estimaciones de la distribución de las diferentes Variables Biofísicas del arbolado a escala completa de Andorra, pero otras escalas más detalladas, valle o monte determinado, pueden no resultar adecuados para la visualización y cómputo de los resultados obtenidos. Los datos LiDAR utilizados provienen de un vuelo generalista de 1 punto/m², no específicamente diseñado para el estudio de los bosques, también respecto al preprocesado. Sin embargo, que los datos se hayan adquirido los días 4 y 5 de octubre de 2018 es adecuado para captar la información de los bosques, por tener todo el territorio volado con poco tiempo de diferencia y por ser una fecha adecuada para la fenología de las especies (en general aún con las hojas sin caer, poca presencia de nieve...). Sin embargo, la diferencia temporal con los datos de campo de 4 años aporta algunas dificultades por los cambios que se hayan podido producir entre el vuelo y el inventario a bosque, factor que también puede dificultar la elaboración de modelos predictivos, dado que es una variabilidad no detectada con los datos.

Por otra parte, parte de la variabilidad y el error en la predicción puede venir por



los datos considerados "verdad-terreno", los calculados en las parcelas INF. Cuantos menos procesos haya para obtener las variables menos error se acumula, por lo tanto, se estima que una variable como la altura media, más directa de obtener y de una sola dimensión (metros lineales), es más precisa que otras como la del Volumen de madera, la Biomasa y sus incrementos, con más dimensiones y cálculos intermedios. Esto se ve reflejado en el RMSE de los *random forests*, con y sin factor de corrección posterior, donde el Hm tiene un error menor que BAT y que ICAT, por ejemplo.

En cuanto al método de modelización, los modelos de *random forests* entrenados para generar los mapas presentan baja capacidad de predicción, dado las evaluaciones de los errores y, además, teniendo en cuenta que se ha incorporado un factor de corrección basado en la modelización *ad hoc* del error de predicción. Este factor de corrección no aporta una reducción significativa de los errores de predicción, pero si reduce el sesgo sistemático y mejora el rango de predicción de cada variable. Inicialmente se decidió emplear *random forests* por la elevada robustez y la alta capacidad que presenta esta técnica para procesar muchas variables con diferentes grados de correlación entre ellas, a pesar de tener un conjunto de datos pequeño (194 parcelas respecto a las 25 métricas LiDAR inicial), siempre en el contexto de que el objetivo es tener una herramienta predictiva y no explicativa.

Además, esta herramienta predictiva sólo se prevé utilizarla para generar una sola vez los Mapas de Variables Biofísicas para toda la extensión de Andorra a partir de los datos del INF, y no aplicarla a otros territorios ni otros conjuntos de datos. Hay que tener en cuenta, también, que futuros vuelos LiDAR y nuevos inventarios INF requerirán generar nuevas herramientas de modelización. Sin embargo, en el contexto de este estudio se podrían haber empleado otras metodologías de modelización, como los modelos no lineales o los mixtos, con el fin de encontrar un método con menor error final, que no fuera necesario incorporar un factor de corrección en base al error y que incluso tuviera cierta capacidad explicativa.

6. Conclusiones

La realización de la primera medida del INF-AND en 2022 ha proporcionado información valiosa para la caracterización y seguimiento de los bosques. Con estos datos, además de realizar una primera caracterización silvo-dasométrica, se ha realizado una estimación del carbono almacenado y de la capacidad de fijación anual. Por otra parte, la cobertura de Andorra con un vuelo LiDAR de 2018 ha permitido una primera espacialización de la información del INF, generando los primeros Mapas de Variables Biofísicas de Andorra. Estos mapas ofrecen una visualización continua de las variables a escala de paisaje, con potencial para la zonificación y diferenciación entre zonas.

Las próximas actualizaciones de los datos LiDAR e INF, con las posibles mejoras metodológicas, permitirán generar nuevas versiones que aporten información de la evolución por comparación y de más detalle y de nuevas variables si los datos lo permiten. También hay opciones de mejora con la representación de Variables descriptivas de otros tipos de cubiertas, principalmente matorrales no arbolados y prados. Por último, la incorporación de datos de teledetección del sistema Copernicus, por ejemplo, también presenta un gran potencial para mejorar el estudio y conocimiento de la cubierta forestal de Andorra y su evolución y adaptación al cambio climático.



7. Agradecimientos

Andorra Recerca + Innovació agradece la financiación recibida por parte de la Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic d'Andorra en el marco del estudio de impactos y vulnerabilidades del cambio climático y la capacidad de sumidero de Andorra.

CTFC y AR+I agradecen la dedicación y esfuerzo realizado por aquellas personas implicadas en diferentes fases del diseño y elaboración del INF1-AND y de sus primeros productos: Marc Font, Albert Ruzafa, Kilian Varela, Aleix Sánchez, Martí Salvador, Sònia Navarro, José Ramón González, Aitor Améztegui, Jordi Ordoñez y Gerard Grande.

8. Bibliografía

ALBERDI, I.; MORENO-FERNÁNDEZ, D.; CAÑELLAS, I.; ADAME, P.; HERNÁNDEZ, L.; 2020. Deadwood stocks in south-western European forests: Ecological patterns and large scale assessments. *Sci. Total Environ.* 747, 141237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141237>

BELTRAN, M.; BUSQUETS, E.; PIQUE, M.; DOMENECH, M.; TRAVESSET-BARO, O.; 2023a. 1r Inventari Nacional Forestal (INF1) del Principat d'Andorra. Metodologia d'establiment i seguiment de la xarxa de parcel·les permanents. doi:10.5281/zenodo.11175092

BELTRAN, M.; BUSQUETS, E.; PIQUE, M.; LLENA, G.; DOMENECH, M.; GRANDE, G.; TRAVESSET-BARO, O.; 2024. 1r Inventari Nacional Forestal (INF1) del Principat d'Andorra. Mapes de Variables Biofísiques dels boscos d'Andorra. doi:10.5281/zenodo.11195088

BELTRAN, M.; BUSQUETS, E.; PIQUE, M.; LLENA, G.; DOMENECH, M.; TRAVESSET-BARO, O.; 2023b. 1r Inventari Nacional Forestal (INF1) del Principat d'Andorra. Estimació de l'estoc i l'embornal de carboni total als boscos d'Andorra. doi:10.5281/zenodo.12519202

CARRERAS, J.; CARRILLO, E.; FERRÉ, A.; PEREZ-HAASE, A.; NINOT, J.M.; CARITG, R.; 2012. Mapa dels Hàbitats d'Andorra 2012 a escala 1:25.000.

CENMA/IEA; 2012. Mapa de Cobertes del Sòl d'Andorra.

DE CACERES, M.; CASALS, P.; GABRIEL, E.; CASTRO, X.; 2019. Scaling-up individual-level allometric equations to predict stand-level fuel loading in Mediterranean shrublands. *Ann. For. Sci.* 76, 1–17.

DGCN; 2005. Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2007): Catalunya. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

DGDRPF; 2017. Cuarto Inventario Forestal Nacional (2014-2016): Catalunya.

DGDRPF; 2016. Mapa Forestal de España. Escala 1:25.000. (MFE25). Catalunya.



Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

GRACIA, C.; IBÁÑEZ, J.J.; BURRIEL, J.A.; MATA, T.; VAYREDA, J.; 2004. Inventari ecològic i forestal de Catalunya.

ICGC; 2018. Mapa de Variables Biofísiques de l'arbrat de Catalunya [WWW Document]. URL <https://www.icgc.cat/ca/Geoinformacio-i-mapes/Mapes/Mapes-de-variables-biofiques-de-larbrat-de-Catalunya>

IGN; 2022. Inventaire Forestier National [WWW Document]. URL <https://inventaire-forestier.ign.fr/>

LÓPEZ-SENEPLEDA, E.; CALAMA, R.; RUIZ-PEINADO, R.; 2021. Estimating forest floor carbon stocks in woodland formations in Spain. *Sci. Total Environ.* 788, 147734. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147734

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M.; RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; CALAMA, R.; 2021. Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *Eur. J. For. Res.* 140, 675–689. doi:10.1007/s10342-021-01354-3

MONTERO, G.; LÓPEZ-LEIVA, C.; RUIZ-PEINADO, R.; LOPEZ-SENEPLEDA, E.; ONRUBIA, R.; PASALODOS-TATO, M.; 2020. Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizontes orgánico superficial de los suelos forestales.

PIQUÉ, M.; CASTELLNOU, M.; VALOR, T.; PAGÉS, J.; LARRAÑAGA, A.; MIRALLES, M.; CERVERA, T.; 2011. Integració del risc de grans incendis forestals (GIF) en la gestió forestal: Incendis tipus i vulnerabilitat de les estructures forestals al foc de capçades. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST), Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya, Barcelona.

RODRÍGUEZ MARTÍN, J.A.; ÁLVARO-FUENTES, J.; GONZALO, J.; GIL, C.; RAMOS-MIRAS, J.J.; GRAU CORBÍ, J.M.; BOLUDA, R.; 2016. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma* 264, 117–125. doi:10.1016/j.geoderma.2015.10.010

STAKĖNAS, V.; VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ, I.; SIRGEDAITĖ-ŠĖŽIENĖ, V.; ARMOLAITIS, K.; ARAMINIENĖ, V.; MURAŠKIENĖ, M.; ŽEMAITIS, P.; 2020. Dead wood carbon density for the main tree species in the Lithuanian hemiboreal forest. *Eur. J. For. Res.* 139, 1045–1055. doi:10.1007/s10342-020-01306-3