



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a  
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

**Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**

**ISBN 978-84-941695-6-4**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

---

Organiza



## MySustainableForest: Desafíos de la gestión forestal y soluciones basadas en la Observación de la Tierra

**YAGÜE BALLESTER, J.<sup>1</sup>, MERLO SÁNCHEZ, E.<sup>2</sup>, LIZARRALDE TORRE, I.<sup>3</sup>; MARINI GOVIGLI, V.<sup>4</sup>, FERNÁNDEZ CARRILLO, A.<sup>1</sup>, PIÑEIRO GARCÍA, M.<sup>4</sup>, FRANCO NIETO, A.<sup>1</sup>, REVILLA ROMERO B.<sup>1</sup> y SEBASTIÁN LÓPEZ, A.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> División de Teledetección y Análisis Geoespacial, GMV, C/Isaac Newton 11, P.T.M. 28760 - Tres Cantos (Madrid).

<sup>3</sup> Madera Plus Calidad Forestal S.L., Edificio CEI, 204, Parque Tecnológico de Galicia. 32900 - S. Cibrao das Viñas (Ourense).

<sup>2</sup> Fora Forest Technologies, S.L.L., C/Alonso de Velazquez 2, P2, 1A, 42003 - Soria (Soria).

<sup>4</sup> EFIMED (Oficina Regional Mediterránea del Instituto Forestal Europeo). Recinto Modernista St. Pau, Pabellón de St. Leopold. C/Sant Antoni M. Claret 167. 08025 - Barcelona (Barcelona).

### Resumen

MySustainableForest (<https://mysustainableforest.com/>) es un proyecto financiado por la Unión Europea bajo el programa marco Horizonte 2020 (nº 776045). El proyecto, liderado por GMV, tiene como objetivo facilitar la gestión de las masas forestales mediante el uso sistemático de datos de satélite, LiDAR y sónicos, junto con modelos de calidad de la madera y datos registrados *in situ*. El proyecto se ha desarrollado entre 2017 y 2020 por un consorcio de 10 entidades, de las cuales, cuatro son las desarrolladoras de productos y con oficina en España: GMV, Föra, Madera+ y el Instituto Forestal Europeo (EFI). Las otras seis entidades son los socios validadores en seis países europeos: Croacia, España, Francia, Lituania, Portugal y República Checa. En este proyecto, se han desarrollado 21 productos comerciales (<https://mysustainableforest.com/services/portfolio/>) asociados a 6 servicios forestales diferentes: caracterización de bosques; caracterización de la madera; volumen, biomasa y stock de carbono; estado de salud del bosque; vulnerabilidades de los ecosistemas; y contabilidad de recursos. La plataforma proporciona a propietarios y gestores forestales un notable avance en la gestión silvícola: actualización del inventario, valoración de daños bióticos, densidad de la madera o contabilidad ambiental, son algunas de las aplicaciones posibles.

### Palabras clave

Gestión forestal sostenible, Teledetección, Satélite, LiDAR, Contabilidad ambiental, Madera.

### 1. Introducción

Los inventarios forestales son una de las principales fuentes de información desde la perspectiva ecológica y dasométrica; llevados a cabo en ciclos de 5 a 10 años con notables recursos humanos, sin la posibilidad de una proyección espacial a gran escala. Actualmente, las tasas de cambio forestal, sobre todo relacionadas con los daños bióticos y abióticos, así como el aumento de plantaciones de turno corto para biomasa o pasta, exigen herramientas capaces de monitorear con mayor frecuencia la extensión de bosque, los atributos de la madera disponible o los diferentes servicios ecosistémicos surgidos (McRoberts & Tomppo, 2007; Tomppo et al., 2010; Vidal et al., 2016). La falta de datos precisos en tiempo real es uno de los desafíos a los que se enfrentan los gestores forestales en los ámbitos local y regional en la gestión del ciclo de producción de la madera y de otros servicios forestales, de manera coherente y adaptada a sus necesidades (Masek et al., 2015; Pause et al., 2016). La Teledetección satisface esta demanda de datos, ya que proporciona datos periódicos y espacialmente continuos sobre el estado de los bosques.

El proyecto MySustainableForest (MSF) proporciona una plataforma de servicios comerciales para que los gestores forestales integren datos *in situ* y de teledetección en los procesos de toma de decisiones y las operaciones diarias. La plataforma proporciona un portfolio de productos basados en Observación de la Tierra (OT), que ofrecen soluciones operativas y sostenibles para apoyar las

actividades forestales como la definición de políticas locales, regionales y nacionales, planes de gestión forestal a diversas escalas; proyectos de valoración forestal; pago por servicios ecosistémicos, etc.



*Figura 1. Logo del proyecto.*

Estos productos integran y combinan datos de satélite (Boyd & Danson, 2005; Holmgren & Thuresson, 1998; Wood et al., 2002), LiDAR (Dubayah & Drake, 2000; Lim et al., 2003; Wulder et al., 2012), mediciones sónicas no invasivas y extracción de cores para la calidad de la madera (Merlo et al., 2014; Caballé et al., 2020) y estadísticas de contabilidad forestal (Accounting, 2014). El proyecto ha demostrado la ventaja de este tipo de productos en la toma de decisiones, protocolos y operaciones diarias de los diferentes actores de la cadena silvícola. MSF constituye una herramienta para la mejora de la gestión sostenible, precisa y exhaustiva de las masas forestales mediante el uso sistemático de datos remotos y no invasivos junto con los tradicionales datos registrados *in situ*. Además, facilita el acceso a nuevos datos a selvicultores y propietarios forestales, suponiendo un notable avance para las prácticas de producción. Esto se debe a que los sistemas remotos proporcionan información para la geolocalización y caracterización de recursos forestales. Sin embargo, la obtención de la información sobre el estado de las masas forestales y la calidad de la madera no es trivial, debido a que plantea una serie de desafíos tecnológicos, comerciales, sociales y políticos.

Los servicios de MSF proporcionan a los usuarios un apoyo en los diferentes procesos de toma de decisiones dentro del ciclo silvícola. La disponibilidad de información actualizada y precisa a bajo coste es fundamental para un apoyo eficaz a la planificación y la ordenación forestal. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y fotografía aérea es ampliamente utilizado en el sector forestal. Sin embargo, en general, no ocurre lo mismo con el uso de imágenes de satélite, LiDAR u otras nuevas tecnologías de teledetección, a pesar de su reconocido potencial. Los productos de MSF integran las capacidades existentes de diversas tecnologías: teledetección, procesamiento de imágenes, modelos estadísticos, inteligencia artificial (*Machine Learning* y *Deep Learning*) sobre la base de la ciencia forestal. Para que los productos cumplan con las necesidades reales del mercado, ha sido importante integrar los retos a los que se enfrenta el gestor forestal en el diseño de los productos, así como promover la implicación de los usuarios finales y el conocimiento de cada escenario forestal.

Los **proveedores** de los servicios de MSF son: GMV, un grupo empresarial tecnológico de capital privado con presencia internacional y con sede en Madrid con gran experiencia en el uso de satélites para aplicaciones forestales; Föra Forest Technologies una PYME spin-off de la Universidad de Valladolid fundada por doctores en modelización forestal y con una amplia bases en investigación y lazos con universidades y centros de investigación; Madera+ es una PYME gallega con gran experiencia en predecir y modelizar propiedades tecnológicas de la madera a partir de mediciones *in vivo* sobre la masa forestal y el Instituto Forestal Europeo (EFI), organización internacional establecida por parte de estados miembros de la Unión Europea para promover la investigación y soporte político sobre temáticas forestales. Con sus más de 130 organizaciones en su red y cuatro centros de proyecto, ofrece los mejores contactos de investigación forestal y de colaboración reconocida a nivel europeo. Además, el consorcio está compuesto por seis usuarios finales en seis países europeos: Croacia, España, Francia, Lituania, Portugal y República Checa, cuyo papel también ha sido de

validadores y expertos de sus correspondientes áreas (16 en total) y que se dividen en dos grupos: [1] **centros de investigación industrial**, representados por el Instituto de Investigación del Bosque y del Papel de Portugal (*Instituto de investigação da Floresta e do Papel, RAIZ*), la Universidad Mendel en Brno de República Checa (*Mendelova Univerzita V Brne, UFE*) y el Instituto de Investigación Forestal de Croacia (*Hrvatski Šumarski Institut, CFRI*); y [2] **asociaciones de propietarios forestales**, en concreto, la Asociación de Propietarios Forestales de Navarra (*Foresna-Zurgaia*), el Centro Nacional de la Propiedad Forestal de Francia (*Centre National de la Propriété Forestière, CNPF*) y la Asociación de Propietarios Forestales de Lituania (*Lietuvos Miško ir Žemės Savininkų Asociacija, FOAL*).

## 2. Objetivos

Los objetivos de MSF son:

- Apoyar a los administradores forestales, propietarios o industrias de madera con productos geoespaciales desarrollados *ad hoc* para escenarios concretos, derivados de datos de satélite, LiDAR e *in situ*, mediante la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial.
- Facilitar el acceso del cliente a los productos geoespaciales a través de una plataforma web, sin necesidad de conocimiento específico por parte del usuario.
- Optimizar la calidad, facilidad de uso y rentabilidad de los productos geoespaciales en la gran comunidad europea de propietarios y gestores de bosques.

## 3. Metodología

Los productos de MSF se han desarrollado y validado en dieciséis áreas de demostración en seis países europeos sobre bosques atlánticos, mediterráneos, continentales y boreales, cubriendo más de un millón de hectáreas. Sobre dichas áreas, GMV ha desarrollado los productos con imágenes de satélite, Föra Forest Technologies los productos LiDAR, Madera Plus Calidad Forestal los productos de calidad de la madera, y la Oficina Regional Mediterránea del Instituto Forestal Europeo (EFIMED) los productos de contabilidad forestal. Todos los modelos generados son fácilmente adaptables a otras áreas fuera de estas zonas piloto, siempre que existan similitudes en las características del entorno.

### 3.1. Datos

Los productos combinan una gran cantidad de datos, procedentes de múltiples fuentes y organizaciones a diferentes niveles, que podemos dividir en diversos orígenes:

- **Imágenes de satélite multiespectrales y multitemporales de alta y muy alta resolución.** Las imágenes proceden de: (i) misiones Copernicus (Sentinel-2), y misiones contribuyentes (WorldView-2) proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA); (ii) y misiones Landsat (Landsat-8 y Landsat-5) proporcionadas por la NASA.
- Datos procedentes de **vuelos LiDAR**, en algunos casos multitemporales.
- Datos recogidos en campo: **Velocidad de ondas sónicas** sobre el fuste y extracción de cores relativos a la calidad de la madera, datos dasométricos, puntos de control para la validación de datos satelitales y de LiDAR, etc.
- **Datos estadísticos** y socioeconómicos necesarios para realizar estadísticas de contabilidad forestal. Estos datos incluyen, entre otros, estimaciones de los precios de madera y sus variaciones en el tiempo, estado de propiedad (pública o privada) de las superficies forestales
- **Otras fuentes de datos** han sido los derivados de los planes de gestión forestal o campañas de campo, que son utilizados como inputs para algunos productos. Además, información de referencia como los Inventarios Forestales Nacionales, mapas forestales, datos climáticos y fisiográficos, etc. de los seis países donde se ha trabajado en MSF.

### 3.2. Producción de los servicios MSF

MSF proporciona servicios que tratan de dar respuesta a aspectos concretos de la gestión forestal. Cada servicio se compone de una serie de productos, cuyo desarrollo ha seguido un ciclo de cinco etapas: planteamiento inicial del problema con los usuarios forestales locales, revisión bibliográfica, diseño, prototipado y validación.

En la primera y segunda etapa, los usuarios finales proporcionan detalles precisos sobre sus necesidades de gestión y la utilidad de productos con unas características concretas. En esta etapa, se discuten los requisitos mínimos y características básicas que ha de tener un producto para dar respuesta a una problemática determinada dentro de la gestión forestal. Tras establecer las primeras bases, se realiza una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas para obtener una visión global de los antecedentes y las soluciones planteadas basadas en datos de teledetección e ingeniería forestal. Con esto, se establece un marco teórico completo y se marcan unas líneas básicas de diseño.

Durante la tercera etapa, se traza un diseño preliminar, la arquitectura fundamental del algoritmo del producto. Se presta especial atención a las fuentes de datos disponibles y a la optimización de los recursos para alcanzar el fin que se pretende.

En la etapa de prototipado, se llevan a cabo distintas iteraciones de implementación, validación interna y mejoras, hasta que el algoritmo alcanza el nivel de fiabilidad requerido. Se pone especial esfuerzo en lograr un nivel máximo de automatización de los procesos, que incluyen la algoritmia completa desde la descarga y pre-procesamiento de los datos hasta la generación de los productos con su metadato correspondiente.

Por último, una vez que los productos han sido generados, pasan un proceso de validación interna y son entregados a los socios locales para una revisión exhaustiva de calidad y usabilidad, que constituirá la validación externa del producto. La validación interna la llevan a cabo los productores (GMV, Fora, Madera+), y consiste principalmente en una serie de controles de calidad y precisión de los productos mientras el procesamiento está en marcha. Este control de calidad ha de ajustarse tanto a la naturaleza de los datos de entrada como a la disponibilidad de datos de validación, habiendo algunos casos en los que no es posible realizar dicho control de calidad por falta de datos. En algunos casos, se utilizó la validación cruzada como método de control de la calidad de los productos.

Una vez los productos han pasado un control de calidad interno se procede a la validación externa llevada a cabo por parte de los socios validadores. Los gestores forestales son los mejores conocedores de las masas forestales que gestionan. Por tanto, son ellos los encargados de evaluar los productos en función de su conocimiento directo del área de interés, analizando en todo momento cómo se ajustan los resultados a sus necesidades.

En el proyecto, el proceso completo de producción, desde la concepción del producto hasta su entrega y validación, conllevó tres ciclos de producción y mejora, hasta alcanzar un nivel óptimo. Por tanto, tres versiones de cada producto fueron diseñadas, prototipadas y validadas con el objetivo de recibir una visión completa de su calidad y usabilidad; las sugerencias y observaciones recibidas de los usuarios en cada iteración fueron la base de las mejoras alcanzadas en cada ciclo de producción.

### **3.3. Diseño de la Plataforma MSF**

Con el objetivo de dar servicio a los gestores forestales se diseñó una plataforma web desarrollada por GMV, con capacidades de procesamiento, visualización y descarga de los productos temáticos y sus metadatos según estándares ISO e INSPIRE.

La plataforma, cuyas especificaciones finales se encuentran en la sección de resultados, se desarrolló en continuas iteraciones con los usuarios, de forma que cada prestación se adaptara a la visión y las necesidades del sector forestal, sin dejar de lado el uso de las últimas tecnologías para un funcionamiento robusto del sistema. El motor de procesamiento para los algoritmos utiliza Python y el encapsulamiento de los algoritmos se articula en contenedores Docker. En cuanto a los visores y la

catalogación de datos y metadatos se usaron como base Leaflet, GeoServer y GeoNetwork. Junto con estas capacidades, se diseñó un formulario de petición de productos (<http://msfplatform.com/MSF-PRF/>) y un sistema de gestión de cuentas de usuario.

## 4. Resultados

### 4.1. Los servicios y productos de MSF

Los servicios de MSF son paquetes de productos forestales basados en OT que respaldan la Gestión Forestal Sostenible. Se ofrecen seis servicios:

**Servicio 1 - Caracterización de los bosques:** Monitoreo y análisis de las características básicas de los componentes del bosque. Está formado por diez productos:

1. **Máscara de bosque:** Clasificación binaria de cubiertas forestales y no forestales. Es la base para otros productos como la clasificación de tipos de bosques o el monitoreo de estrés de la vegetación (Fernandez-Carrillo et al., 2019a; Fernandez-Carrillo, et al., 2020). Este producto se elabora con imágenes Sentinel-2 (Alta Resolución), imágenes de Muy Alta Resolución y con datos LiDAR.
2. **Infraestructuras forestales:** Base de datos geográficos de infraestructuras forestales basada en el estándar cartográfico internacional MGCP a escala 1:5.000. El producto describe geográficamente las principales características cartográficas forestales divididas en las siguientes clases temáticas: redes de transporte, hidrografía, poblamiento, industria, energía y usos/cubiertas del suelo.
3. **Tipos de bosques principales:** Clasificación supervisada de los principales tipos de bosque en el que se establece la distribución espacial de especies forestales dominantes, identificando la mezcla de especies presentes dentro de una misma área (Fernandez-Carrillo et al., 2019b).
4. **Altura:** Cálculo de la altura dominante del dosel arbóreo de los rodales. Los modelos de alturas del dosel se calculan con alta precisión a partir de las estadísticas LiDAR, pudiendo ser ésta en algunos casos la altura media de Lorey (*Lorey's Height*) o la altura media (*Mean Height*), por pixel y por rodal.
5. **Edad del bosque:** Clasificación de la edad del bosque en base al pixel obtenida mediante el análisis de series multitemporales de datos de satélite de las misiones Landsat (1984-2015) y Sentinel-2 (desde 2016). Debido a la extensión del registro de datos, el producto no puede distinguir rangos de edad anteriores a mediados de la década de 1980 y se le asigna una categoría única que se etiqueta como “mayores de 35 años”.
6. **Área quemada:** Cuantificación de la superficie quemada mediante técnicas de detección de cambios entre dos fechas: pre-incendio y post-incendio. El análisis permite estimar la intensidad que ha tenido el incendio en las cubiertas forestales lo que permite realizar evaluaciones de daño y respaldar planes de recuperación.
7. **Cortas:** Monitoreo y detección de áreas donde se han producido cortas y claras en la cubierta forestal. Requiere una máscara de bosque de una fecha inicial determinada a la que se aplican algoritmos de detección de cambios.
8. **MDE - elevación, pendiente y orientación:** A partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se deriva el cálculo de las pendientes y orientaciones del terreno, parámetros clave que permiten modelizar el relieve para el análisis del terreno.
9. **Índice de sitio:** Indicador de la productividad. Es una representación gráfica de la capacidad productiva de un rodal forestal, base para muchas actividades de gestión. Para su cálculo es necesario tener disponibles dos vuelos LIDAR consecutivos junto con información sobre la curva del índice del sitio.
10. **Densidad del rodal:** Indicador calculado a partir de datos LiDAR en el que se estima el número de árboles por unidad de superficie.

**Servicio 2 - Propiedades de la madera:** Modela y analiza los atributos de la fibra de madera relacionados con el potencial y el rendimiento de los productos madereros, como el rendimiento de pulpa, la densidad, la resistencia y la rigidez. Consta de tres productos:

11. **Densidad básica de madera:** la densidad es una de las propiedades más importantes de la madera. A nivel del rodal se mide *in situ* extrayendo los cores de madera sobre una muestra representativa de los árboles y analizándolos posteriormente en laboratorio. Esta propiedad es una característica de la calidad de la madera muy importante para la industria de la celulosa: cuando aumenta, las necesidades de materia prima son menores, y los rendimientos son mayores. Para este producto se construye un modelo matemático que predice la densidad básica media de la madera en la parcela utilizando datos de satélite multitemporales, LiDAR, climáticos y fisiográficos. Este producto está disponible con una precisión de  $\pm 18\text{kg/m}^3$  para masas de *Eucalyptus globulus*, de entre 8 y 20 años de edad, Dependiendo de las necesidades del usuario, esta densidad se puede medir en campo, para validar y mejorar la precisión del modelo.
12. **Rigidez de la madera:** la rigidez o módulo de elasticidad (MOE) es una medida de resistencia de la madera a la deformación bajo carga aplicada y es un buen indicador de la calidad de la madera para usos estructurales y de su clase resistente según la normativa (UNE-EN 338). A nivel de árbol, la rigidez se determina *in situ* mediante el módulo de elasticidad dinámico calculado a partir de la velocidad de desplazamiento de una onda de impacto aplicada en el fuste y los datos de densidad verde de la madera y utilizando la siguiente ecuación  $\text{MOE}=\text{V}^2\text{x}_{\text{dg}}$ . Después de eso se construye un modelo matemático que predice el MOE medio de la parcela en  $\text{N/mm}^2$  utilizando datos multitemporales de satélite, LiDAR y fisiográficos basado en otros modelos previamente desarrollados (Merlo et al., 2014). Este producto está disponible para masas adultas, cercanas a la edad del turno de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* con un error de predicción de  $\pm 680\text{-}890 \text{ N/mm}^2$ . Dependiendo de las necesidades del usuario, esta rigidez se puede medir en campo, para validar y mejorar la precisión del modelo.
13. **Resistencia de la madera:** este producto se basa en los valores de rigidez de la madera. La clase de resistencia se le asigna a partir de la normativa de clasificación de madera estructural UNE-EN 338 según los valores de la resistencia a flexión estableciendo la siguiente modulación 14; 16; 18; 22; 24; 27; 30; 35; y 40 en coníferas.. Este producto está disponible para masas adultas, cercanas a la edad del turno de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster*.

**Servicio 3 - Volumen, Biomasa y captura del CO<sub>2</sub>:** Estima el volumen de madera de los árboles en un bosque y su contenido de carbono. La biomasa aérea y los productos de captura del CO<sub>2</sub> son clave para la industria de la biomasa y los balances de carbono (Gleason & Im, 2011; Lu, 2006). Tres outputs engloban este producto:

14. **Volumen, biomasa aérea y captura del CO<sub>2</sub>:** el volumen de madera se mide en  $\text{m}^3/\text{ha}$ , de la misma manera que la biomasa se mide en  $\text{t/ha}$  y el CO<sub>2</sub> representa el carbono absorbido por un bosque en ese momento ( $\text{t-CO}_2/\text{ha}$ ). El producto se basa en datos LiDAR, ya sean gratuitos o de pago. Si los datos LiDAR no están disponibles en el área de interés, el proyecto prevé vuelos ad hoc para recopilar datos LiDAR.

**Servicio 4 - Salud forestal:** Evaluación y/o seguimiento el estado de salud de los bosques, identificando la vegetación estresada, debido a perturbaciones bióticas (plagas y enfermedades) y abióticas (sequías u otros factores climáticos) (Fassnacht et al., 2014). Consta de dos productos:

15. **Daño biótico:** Detección y evaluación de la pérdida de vitalidad de las masas forestales producida por perturbaciones bióticas como plagas y/o enfermedades. Por ejemplo, daños ocasionados por la plaga de escarabajo de la corteza - *Ips typographus*- en los bosques checos (Fernandez-Carrillo et al., 2020).
16. **Daño por sequía:** Detección y evaluación de la pérdida de vitalidad de las masas forestales debido a un evento extremo de sequía mediante el análisis multitemporal de índices de vegetación.

**Servicio 5 - Vulnerabilidades del ecosistema:** Informa sobre una serie de descriptores y vulnerabilidades de los ecosistemas, a saber: extensión de la cuenca, red hidrográfica, indicadores de biodiversidad y fragmentación de hábitats. Consta de 2 productos:

17. **Red hidrográfica y cuencas:** base de datos geográfica de la red hidrográfica, adaptada del estándar cartográfico internacional MGCP a escala 1: 5.000. Se destacan las principales características de los ríos, arroyos y cuerpos de agua. Delineación de las cuencas hidrográficas con MDE, incluida la jerarquía de cuenca.
18. **Biodiversidad y Fragmentación de hábitats:** El producto de biodiversidad representa la diversidad intrínseca de la comunidad forestal calculada a través de índices de abundancia, dominancia y uniformidad de especies arbóreas dominantes. El producto de fragmentación de hábitats se obtiene clasificando patrones espaciales de parches de bosque y midiendo la densidad del área forestal para cuantificar la fragmentación. Estos dos productos se derivan con diferentes metodologías y proporcionan resultados independientes.

**Servicio 6 - Contabilidad ambiental:** Proporciona análisis basados en el Sistema de Contabilidad Económica Ambiental (System of Environmental Economic Accounting, SEEA) (Accounting, 2014) propuesto por las Naciones Unidas. Incluye 3 productos:

19. **Contabilidad física de la tierra:** Contabilidad de los activos físicos para los bosques y tierras forestadas (*land accounts*) durante un período contable obtenidos con imágenes satelitales y LiDAR, cuya unidad de superficie son hectáreas.
20. **Contabilidad física de la madera:** Contabilidad de los activos físicos de madera que registra el volumen de los recursos madereros durante un período contable concreto. Este producto está desarrollado con imágenes de satélite y LiDAR, cuya unidad de volumen son metros cúbicos.
21. **Contabilidad monetaria de la madera:** Contabilidad de los activos monetarios de madera que registra el valor de los recursos madereros y sus cambios durante un período contable en un área determinada. Este producto está desarrollado con imágenes de satélite y LiDAR, cuya unidad es el euro.

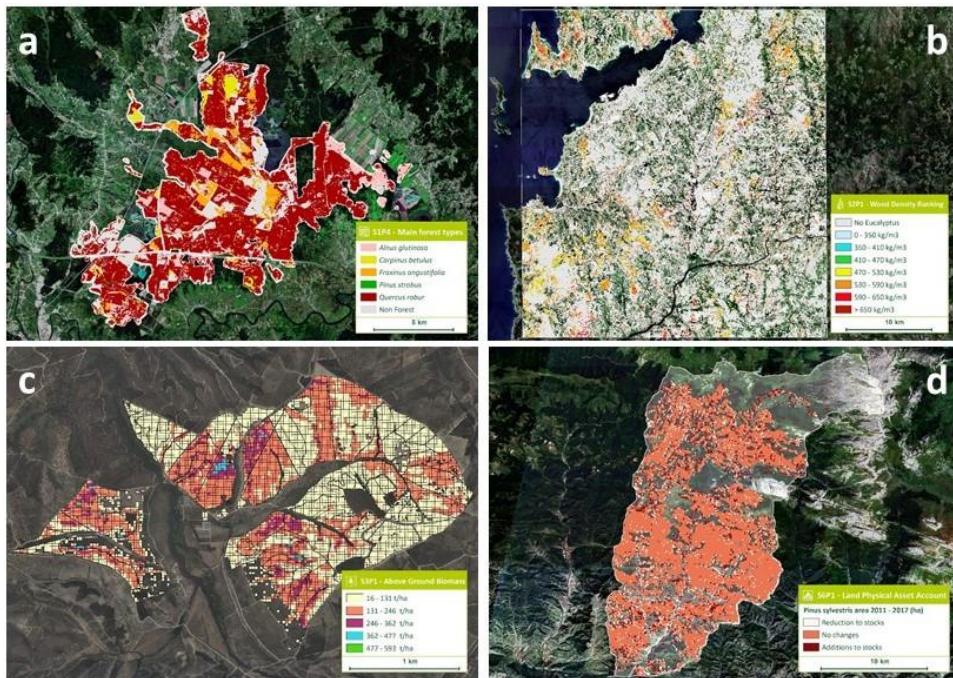


Figura 2. Ejemplos de algunos de los productos de MSF. (a) Tipos de bosques principales en complejo forestal de la cuenca del Río Pokupsko en Croacia. (b) Densidad básica de madera en las comarcas de Vigo, Baixo Miño y O Condado en Galicia. (c) Biomasa aérea o AGB en Caniceira en Portugal. (d) Contabilidad física de la tierra en el Valle del Roncal en Navarra.

## 4.2. La plataforma MSF

La arquitectura final de la plataforma consta de los siguientes elementos y capacidades:

### 1) Capacidades públicas (visibles para todos los usuarios)

- **Página de bienvenida:** se trata de la web del proyecto, que incluye todos los detalles del mismo, como el portfolio de servicios y productos o un resumen de los casos de test realizados.
- **Formulario de peticiones de productos MSF para usuarios:** incluye la carga por parte del usuario de unas coordenadas o archivo vectorial indicando el área sobre la que se desean obtener los productos, así como un listado de los productos que pueden ser solicitados (<http://msfplatform.com/MSF-PRF/>).
- **Catálogo de productos desarrollados:** a través de esta sección, los usuarios pueden acceder a los productos requeridos una vez que estos han sido generados por la plataforma. Incluye la visualización de los detalles de los metadatos, así como un visor de mapas con capacidades básicas. Además, los productos pueden ser descargados por el usuario para su posterior almacenamiento o análisis en un cliente SIG.
- **Visor web:** Se trata de un visor web donde los productos pueden ser consultados en forma de servicio WMS.

### 2) Capacidades para administradores

- **Buscador de imágenes:** Sistema de búsqueda de imágenes de satélite en distintos archivos públicos, como los datos Sentinel del programa Copernicus.
- **Almacenamiento:** Sistema de directorios donde se almacenan todos los inputs, capas intermedias y productos finales generados.
- **Procesamiento:** Incluye la capacidad de procesar los algoritmos de generación de productos en la nube, a partir de contenedores Docker que constan de distintos módulos para el procesamiento completo del producto desde las imágenes brutas hasta el output final.

Todos los datos generados en MSF a través de la plataforma siguen los principios FAIR para la gestión y administración de datos científicos (son fáciles de encontrar, accesibles, interoperables y reutilizables) (Wilkinson et al., 2016). De la misma forma, todos los productos cumplen con los estándares de interoperabilidad definidos por el Open Geospatial Consortium (OGC). Además, todos los productos incluyen conjuntos de datos y metadatos asociados siguiendo la norma ISO 19115 y la Directiva INSPIRE 2007/2/EC.

## 5. Discusión

Las necesidades de información para la gestión forestal son cada vez más complejas y de amplio alcance, lo que plantea nuevos desafíos para los Inventarios Forestales Nacionales (IFN). Se necesitan datos precisos, fiables, de calidad y espacialmente detallados que puedan cubrir grandes áreas, con actualizaciones frecuentes y adaptadas para satisfacer las necesidades de los administradores forestales y los propietarios privados (White et al., 2016). Los IFN plantean una serie de limitaciones: (i) los métodos de inventario en general son heterogéneos, lo que dificulta un seguimiento continuo de los datos; (ii) discontinuidad espacio-temporal de los datos en función de los límites administrativos regionales y nacionales; (iii) en algunos casos introducen una serie de errores de medición, ya que se basan en estrategias de muestreo, lo que agrega incertidumbre a las métricas generadas en escenarios complejos; (iv) necesitan una gran cantidad de recursos y esfuerzos. Los datos de teledetección, tanto imágenes de satélite como LiDAR, ofrecen una resolución espacial,pectral y temporal que aporta valor añadido a las soluciones operativas para la silvicultura. Estos datos introducen mejoras significativas en la capacidad de seguimiento de las propiedades estructurales y funcionales del bosque, además de permitir una actualización constante del estado de dichas variables.

Deben realizarse esfuerzos para crear conjuntos de datos de referencia unificados a escala continental o mundial a fin de definir facilitar la incorporación de datos derivados de la teledetección en los procesos forestales de manera operacional (Vidal et al., 2016), tales como los que promueve la red europea de inventarios forestales nacionales (ENFIN) y que en los que España ha considerado en el IFN4. La plataforma de MSF presenta soluciones para actividades forestales y madereras en las diversas áreas ambientales, socioeconómicas y sistemas de gestión en Europa. Así, los productos de MSF pueden implementarse como un complemento a los inventarios forestales regulares, como plantean los productos de los servicios de **Caracterización de los bosques**, y **Volumen, biomasa y captura de CO<sub>2</sub>**. Por otro lado, son más adecuados para el apoyo al seguimiento y evaluación de riesgos y perturbaciones bióticas y abióticas del bosque en tiempo quasi-real, como aborda el servicio de **Salud forestal**. Además, proporcionan enfoques innovadores para los diversos objetivos de gestión forestal, ya sea producción de madera de alta calidad del servicio de **Propiedades de la madera**, la protección de la biodiversidad del servicio de **Vulnerabilidades del ecosistema**, o la planificación de la gestión forestal en el contexto socioeconómico más amplio del servicio de **Contabilidad forestal**.

MSF ofrece a los gestores forestales la posibilidad de desarrollar predicciones a pequeña escala para aquellos productos más específicos, adaptados a las condiciones locales concretas y tipos de masa diferentes. La creación de productos “ad hoc” supone una ventaja competitiva por su mayor rigor y adaptabilidad a la zona concreta y su implicación con el usuario final. La caracterización de la resistencia de la fibra y la densidad básica de madera con datos remotos supone una gran novedad y con gran potencial para optimizar el aprovechamiento del recurso en el mercado de madera estructural, de la industria del papel e incluso en el cálculo de CO<sub>2</sub>.

## 6. Conclusiones

A lo largo del proyecto MSF se han conseguido desarrollar una plataforma de servicios comerciales y un portfolio de 21 productos de aplicación forestal en 16 áreas de interés en seis países europeos. A lo largo del proyecto, la colaboración con los administradores forestales y la industria ha permitido conocer de primera mano las necesidades y oportunidades que ofrecen sus explotaciones forestales, así como adaptar los productos a las especificidades de cada uno de los territorios y sistemas de gestión en la medida de lo posible. De esta manera, los gestores podrán integrar datos remotos y no invasivos junto con los tradicionales registrados *in situ*, lo que les dotará de más herramientas en los procesos de toma de decisiones y las operaciones diarias, aumentando su eficiencia y eficacia. MSF se presenta como un instrumento que pone de manifiesto las ventajas del uso de observación de la tierra para la Gestión Forestal Sostenible y la obtención de información precisa y actualizada como complemento a los datos *in situ*.

## 7. Agradecimientos

El consorcio de productores de MSF agradece a todos los socios locales por su participación y aportación al proyecto.

Este Proyecto ha sido financiado por la Comisión Europea a través del acuerdo de subvención nº 776045 del programa marco Horizonte 2020.

## 8. Bibliografía

Accounting, U. N. B. of the C. of E. on E.-E. (2014). *System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework*. United Nations Publications.

Boyd, D. S., & Danson, F. M. (2005). Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*,

29(1), 1–26. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp432ra>

Caballé, G., Santaclara, O., Diez, J.P., Letourneau, F., Merlo, E. & Meier, A.M. 2020, 'Where to find structural grade timber: A case study in ponderosa pine based on stand and tree level factors', 522 Forest Ecology and Management, vol. 459, p. 117849

Dubayah, R. O., & Drake, J. B. (2000). Lidar Remote Sensing for Forestry. *Journal of Forestry*, 98(6), 44–46. <https://doi.org/10.1093/jof/98.6.44>

Fassnacht, F. E., Latifi, H., Ghosh, A., Joshi, P. K., & Koch, B. (2014). Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality. *Remote Sensing of Environment*, 140, 533–548. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.014](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.014)

Fernandez-Carrillo, A., Fuente, D. de la, Rivas-Gonzalez, F. W., & Franco-Nieto, A. (2019a). A Sentinel-2 unsupervised forest mask for European sites. *Proc.SPIE*, 11156. <https://doi.org/10.1117/12.2533040>

Fernandez-Carrillo, A., Fuente, D. de la, Rivas-Gonzalez, F. W., & Franco-Nieto, A. (2019b). An automatic Sentinel-2 forest types classification over the Roncal Valley, Navarre: Spain. *Proc.SPIE*, 11156. <https://doi.org/10.1117/12.2533059>

Fernandez-Carrillo, Angel, Franco-Nieto, A., Pinto-Bañuls, E., Basarte-Mena, M., & Revilla-Romero, B. (2020). Designing a Validation Protocol for Remote Sensing Based Operational Forest Masks Applications. Comparison of Products Across Europe. *Remote Sensing*, 12(19), 3159.

Fernandez-Carrillo, Angel, Patočka, Z., Dobrovolný, L., Franco-Nieto, A., & Revilla-Romero, B. (2020). Monitoring Bark Beetle Forest Damage in Central Europe. A Remote Sensing Approach Validated with Field Data. *Remote Sensing*, 12(21), 3634.

Gleason, C. J., & Im, J. (2011). A Review of Remote Sensing of Forest Biomass and Biofuel: Options for Small-Area Applications. *GIScience & Remote Sensing*, 48(2), 141–170. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.2.141>

Holmgren, P., & Thuresson, T. (1998). Satellite remote sensing for forestry planning—A review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 13(1–4), 90–110. <https://doi.org/10.1080/02827589809382966>

Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(1), 88–106. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp360ra>

Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing- based biomass estimation.

*International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297–1328.  
<https://doi.org/10.1080/01431160500486732>

Masek, J. G., Hayes, D. J., Joseph Hughes, M., Healey, S. P., & Turner, D. P. (2015). The role of remote sensing in process-scaling studies of managed forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 355, 109–123.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.032>

McRoberts, R. E., & Tomppo, E. O. (2007). Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 110(4), 412–419.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.034>

Merlo, E., Gonzalez, J. G. A., Santaclara, O., & Riesco, G. (2014). Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acousting measurements, tree, stand and site variables. *Forest Systems*, 23(1), 153–166.

Pause, M., Schweitzer, C., Rosenthal, M., Keuck, V., Bumberger, J., Dietrich, P., Heurich, M., Jung, A., & Lausch, A. (2016). In situ/remote sensing integration to assess forest health-a review. *Remote Sensing*, 8(6), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs8060471>

Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R. E., Gabler, K., Schadauer, K., Vidal, C., Lanz, A., Ståhl, G., & Cienciala, E. (2010). National forest inventories. *Pathways for Common Reporting*. European Science Foundation, 1, 541–553.

Vidal, C., Alberdi, I., Redmond, J., Vestman, M., Lanz, A., & Schadauer, K. (2016). The role of European National Forest Inventories for international forestry reporting. *Annals of Forest Science*, 73(4), 793–806. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0545-6>

White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. (2016). Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619–641. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>

Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, IJ. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

Wood, J. E., Gillis, M. D., Goodenough, D. G., Hall, R. J., Leckie, D. G., Luther, J. E., & Wulder, M. A. (2002). Earth Observation for Sustainable Development of Forests (EOSD): project overview. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3, 1299–1302 vol.3. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026097>

Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., & Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121, 196–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>