



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Proyecto LINHE: “Desarrollo de nuevos protocolos de integración de sensores LiDAR, cámara digital, infrarrojo cercano e hiperespectral”

Autor: Asunción Roldán Zamarrón

Institución: TRAGSA

E-mail: aroldan@tragsa.es

Otros autores: Antolín, R. (STEREOCARTO S.L.); Calzado-Martínez, C. (Universidad de Córdoba); Gómez, A. (STEREOCARTO S.L.); Manzanera, J.A. (Universidad Politécnica de Madrid); Meroño, J.E. (Universidad de Córdoba); Pedrazzani, D. (GMV, S.A.); Pérez, H.H. (GMV, S.A.); Santos, I. (TRAGSA); Valbuena, R. (Universidad Politécnica de Madrid).



RESUMEN:

LINHE es un proyecto en cooperación, con financiación del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en la modalidad Proyectos Tractores del programa PROFIT (convocatoria del 12 de junio de 2006), y que cuenta con los siguientes socios participantes: tres grandes empresas (GMV, S.A., STEREOCARTO, S.L. y TRAGSA), y dos Universidades (Universidad de Córdoba y Universidad Politécnica de Madrid). El objetivo del proyecto LINHE se centra en el desarrollo de aplicaciones para la gestión forestal basadas en el uso combinado de datos procedentes de sensor LiDAR (Light Detection And Ranging) y cámara digital aerotransportados, imágenes de satélite (multi e hiperespectrales) e información del infrarrojo cercano obtenida en campo mediante un sensor portátil. El uso integrado de los distintos tipos de datos debe llevarse a cabo de forma rápida, económica y dinámica, para lo cual se probaron algunos algoritmos ya disponibles, y se establecieron nuevos algoritmos de procesado que permiten correlacionar los datos tomados en campo y los capturados por los distintos sensores. Se desarrolló una aplicación informática específica (visor prototipo LINHE) que permite el manejo y visualización, de forma integrada, de las capas de información generadas como consecuencia de los distintos análisis, proporcionando un catálogo de datos completo y bien documentado. Los tres ecosistemas en los que se tomaron los datos y se validaron los resultados son muy representativos de la Península Ibérica, y con muy distintas características y necesidades de gestión (dehesa de *Quercus ilex* (Córdoba), pinar denso de *Pinus sylvestris* (Segovia) y zona incendiada de *Quercus pyrenaica* y *Pinus pinaster* (Guadalajara)). Los datos manejados, las metodologías desarrolladas y los resultados obtenidos en el ámbito del proyecto aportan elementos muy valiosos para facilitar la planificación y gestión de ecosistemas forestales de muy diversas características.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) en diferentes aplicaciones forestales es una línea de investigación en la que actualmente están involucrados universidades, centros tecnológicos y compañías privadas. Generalmente, la investigación en temas LiDAR está muy enfocada al desarrollo de algoritmos capaces de analizar las vastas cantidades de datos capturados. Estos algoritmos (o filtros) tienen como objetivo obtener diferentes modelos digitales de elevación del terreno y de los objetos que se encuentran sobre él. La mayoría de estos filtros fueron probados y analizados en Sithole y Vosselman (2003).

En el ámbito forestal, los sistemas ALS (Airborne Laser Scanning) se emplean principalmente para la obtención de algunos atributos básicos tales como altura, fracción de cabida cubierta y estructura vertical de la vegetación, a partir de los cuales se obtienen medidas indirectas de otras variables como área basimétrica, volumen maderable y biomasa aérea (Lucas *et al.* 2008; Holmgren *et al.* 2008; Popescu and Zhao 2008; Brandtberg 2007; Goodwin *et al.* 2006; Tickle *et al.* 2006; Lefsky *et al.* 2005; Hyypä *et al.* 2005; Roberts *et al.* 2005; Riaño *et al.* 2004; Riaño *et al.* 2002; Lefsky *et al.* 1999).

A pesar de que hay bastantes trabajos centrados en el empleo de datos LiDAR para la realización de inventarios forestales (Packalén *et al.* 2008; Parker y Evans 2008; Rombouts *et al.* 2008; Næsset *et al.* 2004; Parker *et al.* 2004), están aplicados principalmente a bosques regulares de producción, pero las aplicaciones sobre masas naturales, y en concreto sobre bosques mediterráneos, son aún muy escasas.

Las sinergias derivadas del uso combinado de diferentes tipos de sensores (LiDAR, fotografía aérea, imágenes hiperespectrales, datos radar) aumentan su eficiencia y permiten una mejor caracterización de la estructura, biomasa y composición específica de los ecosistemas forestales (Lucas *et al.* 2008), proporcionando información precisa y muy útil para la gestión forestal. De la integración de sensores se derivan también importantes ventajas en cuanto a las resoluciones temporales y espaciales manejadas, y a la detección de cambios producidos en los atributos forestales de estudio (Wulder *et al.* 2007).

LiDAR puede beneficiarse del apoyo de imágenes (Riaño *et al.* 2007; StOnge *et al.* 2001), proporcionadas por películas de video o por cámaras fotogramétricas convencionales para establecer estructuras. Aunque se ha insinuado que la intensidad de retorno puede aportar información acerca de estructuras, el software necesario todavía no se ha desarrollado, y en este punto la línea de investigación se encuentra todavía a nivel académico. Además, las cámaras digitales ofrecen fotografías color RGB, pancromático e imágenes infrarrojas como productos digitales georeferenciados. Al combinar ALS con datos fotogramétricos obtenidos de modo simultáneo utilizando la misma plataforma aérea, se añade información sobre las características medioambientales biológicas y físicas de los ecosistemas a los parámetros métricos obtenidos por el láser.

La información adicional capturada por otros sensores (sensores de infrarrojo medio, infrarrojo cercano –NIR- y/o espectro visible) ayuda a la clasificación de los datos LiDAR y se utiliza en última instancia para expandir la gama de predicciones más allá de esas áreas donde el uso de LiDAR sería demasiado caro o inadecuado para la estimación de otra información valiosa (distribución de especies, salud de los árboles o estado

fenológico). El espectro infrarrojo ha sido utilizado tradicionalmente para evaluar el estado vegetativo de las plantas, evaluar los daños producidos por incendios, seguir la evolución de plagas o enfermedades, etc. Al combinar varios sensores se ofrece la ventaja de obtener diferentes tipos de datos durante el mismo vuelo (el principio de capturar una sola vez y utilizar varias veces...), aunque también plantea múltiples problemas técnicos aún por resolver. Por otra parte, se abre la posibilidad de obtener cartografía temática “a tiempo real”, lo que está recibiendo actualmente mucha atención ya que reducirá drásticamente el ciclo de producción (en horas o días), y por tanto los costes.

Las imágenes hiperespectrales son herramientas ideales para aplicaciones medioambientales. Una resolución espectral adecuada es importante para la discriminación de ciertas características, tales como la distribución de la vegetación y su estado fitosanitario, que difícilmente pueden detectarse con sistemas de resolución óptica media o configuraciones fotográficas aéreas comerciales. La vegetación tiene una firma espectral única que hace que sea fácilmente distinguida de otros tipos de cubiertas terrestres en imágenes ópticas/infrarrojo cercano. Por lo tanto, una firma espectral característica se puede utilizar para la identificación de los tipos de vegetación o su condición. El nivel de resolución de dichas imágenes ofrece una mejora local en el uso de ópticas de resolución media desde plataformas satélites, ya que proporciona una mejor definición de las relaciones entre la estructura de la masa (densidad de la plantación o cobertura de dosel) y los valores de reflectancia. Esto proporciona una mayor flexibilidad en términos de adquisición de datos, y mejora las posibilidades de obtener imágenes libres de nubes. Además, pueden proporcionar material de muestreo para predicciones prolongadas a áreas grandes utilizando datos más baratos tales como imágenes satélite o capas temáticas en un software GIS.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y OBJETIVOS

Este artículo pretende ser una breve descripción del proyecto LINHE, cuyo objetivo principal es el de diseñar y desarrollar una plataforma de integración y de análisis de datos georreferenciados obtenidos por distintos sensores con la finalidad de facilitar la gestión y toma de decisiones en estudios de carácter forestal. La “herramienta LINHE” para la gestión forestal consiste en un conjunto de procedimientos y utilidades que incluyen técnicas para el procesado y análisis de diferentes tipos de datos, las metodologías empleadas para la adquisición de dichos datos y un visualizador piloto. Los datos utilizados durante este proyecto han sido datos LiDAR, imágenes satelitales hiperespectrales, cámaras digitales aerotransportadas (con los sensores pancromáticos, en color e infrarrojo cercano) y datos en el infrarrojo cercano tomados en tierra, así como datos de campo y distintas estimaciones de parámetros forestales. La herramienta LINHE está pensada para permitir una integración de los datos en un modo ágil, económico y dinámico. Con esta intención, se ha propuesto la utilización de los algoritmos existentes para su análisis y la implementación de nuevos algoritmos destinados al estudio forestal.

El proyecto propone un nuevo modelo metodológico para aplicar las mencionadas tecnologías destinadas a la mejora de la gestión forestal, explotando las diferentes resoluciones espectrales, temporales y espaciales ofrecidas por estos sensores. Con la intención de diseñar un sistema capaz de monitorizar cambios forestales de alta y baja frecuencia, se debe establecer un sistema con una resolución espacio-temporal cruzada mediante la utilización de datos provenientes de múltiples satélites y datos de campo. La experiencia adquirida en la ejecución de otros proyectos pilotos ha ayudado a identificar



solapamientos y ausencia de datos de observación de la tierra y metodologías adecuados para este proyecto.

Durante la realización del este proyecto se persiguieron los siguientes objetivos secundarios: i) incrementar el uso operacional de datos de observación terrestre para políticas de decisión a nivel nacional y regional; ii) proveer productos que puedan ser usados para derivar la información concerniente a la cantidad potencial de carbón existente en bosques; iii) promover unos estándares de datos y metodologías comunes necesarios para la comparación estudios en regiones diversas; iv) estimular mejoras en los diferentes sensores considerados y en el manejo de grandes conjuntos de datos; v) utilizar datos de un variado número de sensores en combinación con datos de campo con la intención de validar los productos realizados durante el proyecto; vi) mejorar el uso de productos de observación de la tierra, la gestión forestal e investigación científica relacionada con los procesos biofísicos de los bosques; vii) proveer las herramientas necesarias para la mejora del uso del actual del Inventariado Forestal Nacional Español para el apoyo de decisiones a nivel operacional; y viii) optimizar las misiones de LIDAR aéreo en vuelos para estudios forestales con el objetivo de estimar los parámetros necesarios en la determinación de las configuraciones óptima y mínima.

Para lograr estos objetivos, se realizaron las siguientes tareas durante la consecución de este proyecto: i) análisis y definición de requisitos para la gestión conjunta de datos heterogéneos; ii) determinación de la metodología de captura de datos LIDAR y cámara digital. iii) definición de las características de los sensores multi-espectrales. iv) determinación de la metodología de captura de datos de la plataforma móvil terrestre. v) definición de parámetros y especificaciones características de los ecosistemas de estudio. vi) recogida de datos hiperespectrales, LIDAR, NIR y de campo. vii) desarrollo de software de post-proceso. viii) estudio de las correlaciones y complementariedades entre los datos. ix) validación de la herramienta piloto.

3. ZONAS DE ESTUDIO

En el proyecto LINHE se consideraron tres zonas de estudio localizadas en España (ver figura 1), con distintas especies, estructura forestal y condiciones climáticas, así como necesidades de gestión muy diferentes. A continuación aparece una breve descripción de cada una de ellas.

La comarca de Los Pedroches está situada al norte de la provincia de Córdoba, y su vegetación más característica se corresponde con formaciones de dehesa de *Quercus ilex*. El principal interés del estudio en la zona fue establecer la base para la integración de diferentes sensores, de distintas resoluciones espacial, espectral y temporal, de cara a optimizar la metodología para la monitorización y seguimiento de ecosistemas complejos.

La zona de estudio del Rodenal se encuentra en la zona norte de Guadalajara. En julio de 2005, un incendio quemó unas 12000 ha de masa forestal, compuesta principalmente por *Pinus pinaster* y *Quercus pyrenaica*. El interés en esta zona se centraba en emplear datos de teledetección para estimar la severidad del incendio y la regeneración, para poder emplear dicha información en la planificación de los trabajos de restauración de la zona.

La zona de estudio de Valsaín es un bosque de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.)

localizado en la provincia de Segovia. El principal interés del estudio de esta área es determinar los parámetros que pueden ser estimados con LiDAR para realizar un inventario forestal suficientemente preciso para apoyar la toma de decisiones de los gestores forestales. No sólo se tienen en cuenta objetivos de producción maderera, sino también medidas de conservación, dado que el pinar de Valsaín contiene diversas especies protegidas, tales como el águila imperial (*Aquila adalberti*), el buitre negro (*Aegypius monachus*) o el lepidóptero *Graellsia isabellae*.

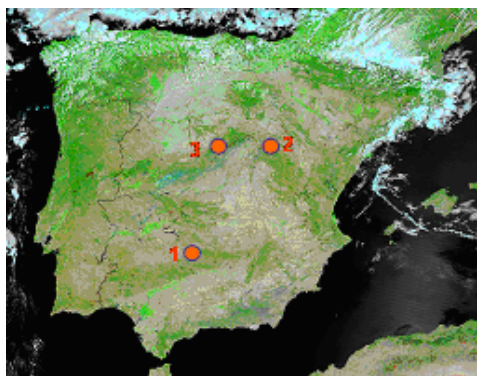


Figura 1: Zonas de estudio: (1) Pedroches, (2) Rodenal, (3) Valsaín (imagen Terra-MODIS adquirida el 30/07/2005, descargada desde MODIS Rapid Response System)

4. MATERIAL Y MÉTODOS

Para cada una de las regiones, se realizó un vuelo donde se adquirieron de forma combinada datos LiDAR y fotogramétricos, usando un sensor ALS50_II Leyca SN073 y una cámara digital DMC ZI SN020 respectivamente. Los tres vuelos fueron realizados a una altura sobre el terreno de 1200 m y una velocidad de crucero de 140 nudos. El sensor láser tenía una frecuencia de medición de 78 kHz y un FOV de 31°. Para la campaña fotogramétrica, se consideró un 60% en el solapamiento longitudinal y un 50% en el solapamiento entre pasadas. Además de los datos obtenidos durante estos vuelos, para las tres áreas de estudio se ha procesado diferente información proveniente de distintas campañas de campo y de imágenes satelitales.

Los sensores utilizados en la zona de Los Pedroches fueron LiDAR, Landsat TM, cámara digital aeroportada Z/I DMC, espectrómetro NIR portátil y un espectrorradiómetro GER 3700. Seis zonas piloto (de aproximadamente 100 ha cada una) fueron seleccionadas para calibrar y validar los diferentes sensores; en ellas, se tomaron en campo, entre otros, los datos inventariales siguientes: cobertura de pasto, matorral y arbórea; existencia de regeneración de *Quercus ilex*; altura, diámetro normal del arbolado, etc. El área volada con sensor LiDAR y cámara Z/I DMC fue superior a las 13000 ha.

En el Rodenal, se utilizó una imagen Landsat-TM capturada el 05/08/2008 (5 días después del incendio) para estimar los niveles de severidad producidos por el fuego, y se emplearon datos LiDAR y de cámara digital para el seguimiento de la regeneración. En julio de 2006 se tomaron datos de niveles de severidad en campo, según una clave visual. En octubre de 2007 se llevó a cabo una segunda campaña de campo en la que se recopiló información sobre la cobertura y las alturas del regenerado. La superficie total capturada por el vuelo con sensor LiDAR y cámara Z/I DMC fue de unas 4600 has.

En Valsaín, una primera exploración permitió completar información necesaria para el seguimiento forestal. Para ello se midieron algunos parámetros forestales, tales como el diámetro normal, la altura del fuste, altura de la primea rama viva, coordenadas de posición, etc. Esta investigación se ha llevado a cabo en una zona boscosa de relieve accidentado, con árboles de gran talla, en rodales regulares. Algunos de estos rodales pueden tener dos estratos, debido a la presencia de regenerado. Entre la vegetación acompañante se encuentran el rebollo (*Quercus pyrenaica*), el enebro común (*Juniperus communis*), arbustos leguminosos tales como la hiniesta (*Genista florida*), helecho común (*Pteridium aquilinum*), etc. Otros trabajos se encaminaron al empleo de GPS para georreferenciar los puntos de apoyo para el vuelo con sensor LiDAR y cámara Z/I DMC. El área total estudiada tiene una extensión de 850 ha.

5. RESULTADOS

5.1 Zona de Los Pedroches (Córdoba)

La reflectancia de los principales elementos del ecosistema fue medida en campo mediante espectrorradiómetro GER 3700 con vistas a la creación de librerías espectrales específicas como referencia para la identificación de los mismos (árboles, pasto, suelo) sobre imágenes de satélite. La cobertura de la vegetación (especialmente, la cobertura arbórea) es un parámetro esencial en la gestión forestal. En el presente trabajo, se planteó una aproximación a la estima de la cobertura vegetal basada en las diferentes potencialidades proporcionadas por la combinación de sensores de distintas resoluciones espectrales, temporales y espaciales.

A escala de detalle, se utilizaron las imágenes de la cámara digital aerotransportada Z/I DMC (resolución espacial de 15 cm de píxel). Dichas imágenes fueron clasificadas siguiendo un procedimiento en dos pasos: primero, se realizó una clasificación no supervisada para la discriminación del suelo iluminado usando la banda 1 (azul), que mostró una mejor separabilidad de las clases de interés (copas arbóreas y suelo sombreado – con bajos DN- vs. suelo iluminado, de altos valores de DN). Una vez discriminadas ambas clases, se aplicó una máscara a la imagen para separar las copas arbóreas de sus sombras. Posteriormente, se realizó una clasificación supervisada con clasificación de píxeles por algoritmo de máxima probabilidad considerando tres clases: copas iluminadas, copas en sombra y suelo sombreado. La cobertura arbórea fue estimada, finalmente, en siete parcelas de control como la suma de la fracción sombreada y la fracción iluminada de las copas, obteniéndose valores de cobertura arbórea desde 6,6 hasta el 35,5% en los casos de estudio.

Utilizando los valores de reflectividad medidos en campo sobre superficies de reflectividad conocida (cuadrantes de plástico gris, cuadrantes de plástico negro, un blanco – estándar de reflectividad del 99% de tipo Spectralon- y una superficie rocosa), se obtuvieron ecuaciones de calibración para cada banda de las imágenes DMC, mostrando un r^2 superior al 0,99 en todos los casos. Dichas ecuaciones relacionan los valores digitales medidos por la cámara DMC con sus valores respectivos de reflectividad en los intervalos de longitudes de onda correspondientes a las cuatro bandas espectrales de la DMC.

A media escala, se utilizó la metodología de análisis de mezclas espectrales (SMA) para estimar la cobertura vegetal a nivel subpíxel sobre una imagen Landsat TM de 17 de julio

de 2007. Dada la homogeneidad forestal en la zona de estudio, se consideraron cuatro componentes característicos del ecosistema: árboles de *Quercus ilex* (única vegetación verde en verano), pasto seco, suelo y sombra. Utilizando los datos tomados mediante radiometría de campo (bibliotecas espectrales antes mencionadas), se obtuvo un modelo lineal de mezclas espectrales en la zona. Dicho modelo fue validado utilizando los datos de cobertura arbórea estimados por el procedimiento anterior (siete parcelas de control clasificadas sobre imágenes DMC), encontrándose una correlación de $r^2=0,89$; del mismo modo, se detectó una cierta infraestimación de la cobertura arbórea en el caso de Landsat comparado con DMC (MBE=2,8). La figura 2 muestra la cobertura arbórea estimada por SMA en la comarca oriental de Los Pedroches sobre Landsat TM de 17 de julio.

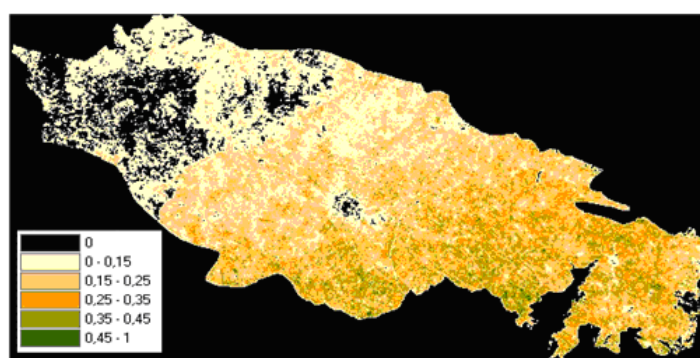


Figura 2: Cobertura arbórea (en tanto por 1) por pixel Landsat en la comarca oriental de Los Pedroches (Córdoba)

Puesto que no se disponían de imágenes DMC históricas, los cambios temporales en la cobertura arbórea fueron estudiados utilizando imágenes Landsat disponibles, comparando dos modelos lineales de mezclas espectrales desarrollados sobre sendas imágenes de 1995 y 2007, de la misma zona. En este periodo temporal, la vegetación de Los Pedroches se mostró estable en un 66,84% de la superficie; en el 17,49% se detectó un incremento de la cobertura arbórea, y una reducción de la misma en el 15,66% de la superficie estudiada. Estos resultados concuerdan con las observaciones de campo (defoliación, pérdidas de árboles y establecimiento de nuevos pies) obtenidas por sucesivas campañas desarrolladas entre los años 2000 y 2007 en seis explotaciones de dehesa. Los errores de ambos modelos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Errores medios cuadráticos en los dos modelos de mezclas espectrales

Modelo	RMS medio	RMS máximo	% de píxeles de RMS max > 0,02
Landsat 1995	0,0036	0,0430	0,44 %
Landsat 2007	0,0064	0,2625	0,02 %

Adicionalmente, los datos LiDAR fueron utilizados para la caracterización vertical de la vegetación. El principal interés en los ecosistemas de la dehesa es la evaluación de la existencia de regeneración de encina, al ser la falta de regenerado uno de los principales

problemas para la sostenibilidad de las dehesas en la zona. A partir de los datos LiDAR se obtuvieron los modelos digitales del terreno y de altura de la vegetación utilizando LiDAR ENVI Tools. Los modelos de vegetación ofrecieron mapas de alturas de vegetación de alto nivel de detalle, donde los pies individuales resultaban claramente diferenciables entre sí en estos ecosistemas caracterizados por una distribución de pies clara o dispersa. En esta situación, la comparación de datos de altura ofrecidos por LiDAR y medidos en campo puede realizarse con facilidad. Sin embargo, pequeños pies del regenerado, o brinzales (de altura inferior a 50 cm) no fueron detectados por LiDAR.

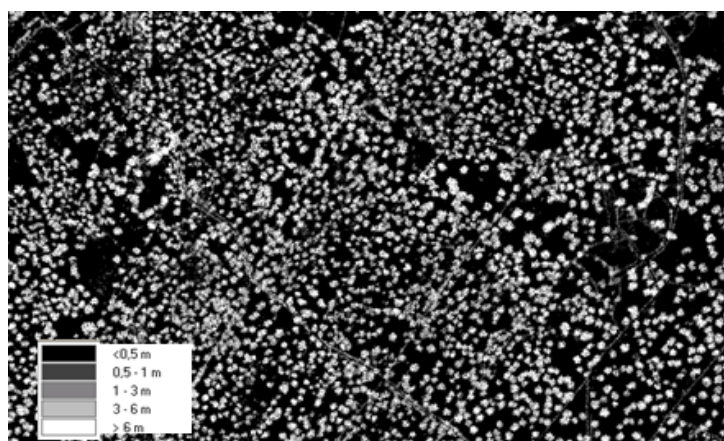


Figura 3: Distribución de Alturas máximas de vegetación en una explotación de dehesa obtenida mediante datos LiDAR.

A muy alto nivel de detalle, finalmente, se utilizó un equipo NIR portátil para caracterizar la respuesta espectral de hoja de encina, suelo, matorral y pasto. Los sensores NIR pueden utilizarse tanto como método secundario de medida, que requieren ser calibrados frente a algún método de referencia primario (aplicaciones cuantitativas o quimiométricas), o bien como método primario basado en la correlación directa de los datos espectrales con indicadores de calidad (aplicaciones cualitativas) (Williams, 2001; Shenk and Westerhaus 1995). La gran complejidad de la señal espectroscópica y la gran cantidad de datos generados (muchos de ellos redundantes por efecto de la superposición de bandas) son otros factores que condicionan el uso de la espectroscopia NIR. En el contexto del proyecto LINHE se utilizó la espectroscopia NIR tanto en la generación de modelos cualitativos como cuantitativos. Desde el punto de vista cualitativo, se aplicó un análisis discriminante PLS2 a los espectros NIR pretatados (pretratamientos SNV y DT), que demostró que la espectroscopia NIR es capaz de clasificar correctamente las hojas de encinas procedentes de pies con distintos niveles de defoliación en un 86,5% de los casos; del mismo modo, con NIR se pudo distinguir pasto soleado vs. pasto bajo copa en el 99% de los casos.

De otra parte, se desarrollaron modelos cuantitativos (quimiométricos) para estimar el contenido de potasio y contenido de humedad en hojas de *Quercus ilex* (n=100 hojas). Estos modelos son aún preliminares y necesitan ser progresivamente afinados usando un tamaño muestral mayor. Cuando sean robustos, sin embargo, estos modelos pueden ser usados para describir los ecosistemas de dehesa a un elevado nivel de detalle. Por ejemplo, estimaciones cuantitativas de diversos componentes basadas en espectros NIR, utilizando así un volumen manejable de datos en un proyecto complejo donde se integra

gran cantidad de sensores, tecnologías y datos procedentes de diferentes fuentes.

5.2 Zona del Rodenal (Guadalajara)

5.2.1 Estimación de la severidad del incendio

Uno de los objetivos en esta zona de estudio era obtener un mapa de severidad del incendio, que pueda ser empleado como cartografía de apoyo para la toma de decisiones en la gestión forestal post-incendio. Dicho mapa se obtuvo mediante el procesado y clasificación de una imagen Landsat 5-TM.

Como primer paso, se corrigió la imagen geométricamente, y posteriormente se obtuvo el índice NBR (Normalized Burnt Ratio), para evaluar los grados de severidad producidos por el incendio (Key y Benson, 1999), ya que este índice combina las dos bandas de Landsat que responden de una forma más llamativa a las superficies quemadas (Infrarrojo cercano IRC (banda 4), e Infrarrojo Medio IRM (banda 7)). El índice responde a la siguiente expresión:

$$NBR = (IRC - IRM) / (IRC + IRM)$$

Se obtuvo después el perímetro del incendio y se elaboró una máscara de la zona quemada que se aplicó al fichero de NBR, para trabajar sólo con la zona afectada. Finalmente, se aplicó una clasificación no supervisada de 3 clases (Isodata), indicativas de los niveles de severidad producidos por el incendio, y se obtuvo un mapa con tres niveles de severidad: alta, media y baja (ver figura). Más detalles sobre el procesado descrito pueden encontrarse en Roldán *et al.*, 2006.

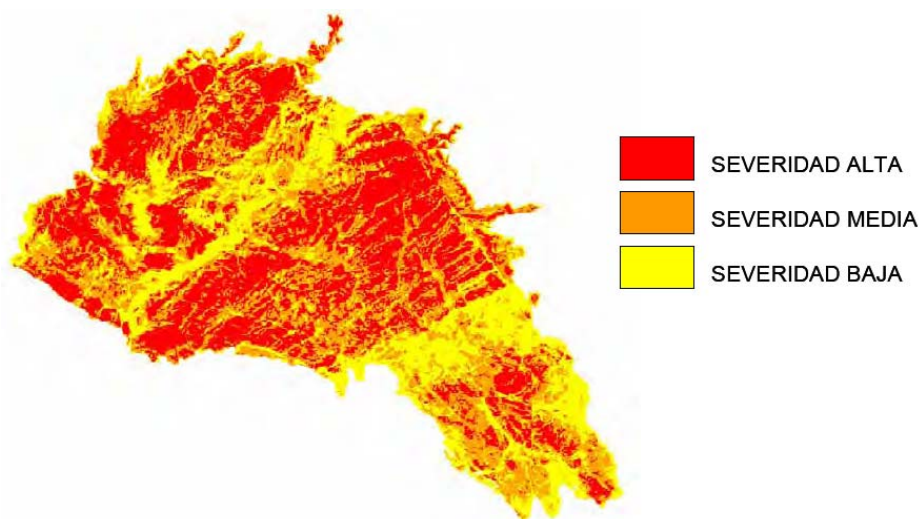


Figura 4: Mapa de la zona incendiada con los tres niveles de severidad considerados.

Se emplearon datos de severidad tomados en campo como “verdad-terreno” para la validación del mapa obtenido, y se obtuvieron una precisión global de 72.73% y un índice kappa de 0.57. El mapa de niveles de severidad tiene una calidad aceptable, especialmente teniendo en cuenta que sólo se empleó una imagen post-incendio, y que

los datos de campo se emplearon sólo para validar, y no para entrenar al clasificador. Dicho mapa puede ser una herramienta útil para los gestores forestales, de cara a una evaluación rápida de la situación tras un incendio forestal.

5.2.2 Estimación de la regeneración

El objetivo de esta parte del trabajo se centraba en obtener una estimación de las zonas en las que se está produciendo regeneración natural de la vegetación, y qué altura tiene dicha vegetación. La especie cuya regeneración presenta un mayor interés es el rebollo (*Quercus pyrenaica*), puesto que es una de las especies dominantes en la zona y hay un abundante regenerado debido a su carácter rebrotador. La regeneración de pino no puede ser detectada por LiDAR debido al pequeño tamaño de las plántulas (de tan sólo dos años).

Para estimar la regeneración se obtuvieron modelos digitales con resolución espacial de 1m, mediante el procesado de los datos captados por el LiDAR aerotransportado: Modelo Digital del Terreno (MDT), Modelo Digital de Superficies (MDS) y Modelo de Alturas de la Vegetación (MDH, obtenido como diferencia entre MDS y MDT). El análisis de los MDT y MDS permitió identificar las tres situaciones que se presentan en el terreno: suelo desnudo, rodales de pinos adultos que sobrevivieron al fuego y regenerado de rebollo.

Las zonas de suelo desnudo se detectaron fácilmente y con gran precisión mediante los MDT, e igualmente los rodales de pinos adultos empleando los MDH. Sin embargo, la detección del regenerado de rebollo presenta serios problemas, ya que numerosas manchas (o golpes) de vegetación no aparecen clasificados como vegetación en el MDH, debido a las características del regenerado de rebollo predominante en la zona, que sólo tiene dos años y en algunas zonas es muy denso y con muy poca altura. La escasa altura de algunos brotes hace que no puedan ser detectados mediante los datos LiDAR, ya que generalmente la mínima altura detectable son 30 cm. Con frecuencia, las manchas de vegetación muy densa son clasificadas como suelo, debido a que los pulsos LiDAR no consiguen atravesar la densa capa de vegetación y rebotan en ella, en lugar de llegar hasta el suelo. Esto también provoca que la estimación de alturas esté falseada en muchas ocasiones. Los problemas citados impidieron una estimación adecuada de las zonas ocupadas por regenerado de rebollo.

Riaño et al. (2007) y Streutker y Glenn (2006) sugieren emplear información espectral de fotografías aéreas adquiridas simultáneamente con los datos LiDAR para paliar los problemas encontrados. En el presente caso, la información espectral disponible fue de escasa ayuda, ya que el vuelo se realizó en noviembre (debido a problemas técnicos y de licencias de vuelo), cuando el rebollo estaba prácticamente en época de reposo vegetativo. Sí se obtuvieron algunas mejoras en la clasificación del regenerado mediante la reducción del tamaño de malla al obtener el MDS, pero es necesario seguir trabajando en esta línea para conseguir mejorar la clasificación de los brotes de rebollo.

5.3 Pinar de Valsaín (Segovia)

Se proporcionó información derivada del sensor Landsat ETM+ de la zona central a la herramienta LINHE de gestión forestal, con las correspondientes correcciones atmosférica, radiométrica y de relieve. Se generó un mapa de coberturas mediante clasificación supervisada de los datos de reflectividad espectral de la superficie,

obteniendo ocho clases de coberturas: urbano o residencial, herbácea, arbustiva, de leñosas perennifolias, de leñosas caducifolias, suelo desnudo y superficies de agua. La precisión general de la clasificación se consideró adecuada. Además, se generó un mapa de índice de humedad de superficie con la herramienta de PCI Geomatica 10.0 KOS Manager, usando la banda 5, de infrarrojo de onda corta. Finalmente, también se generó un mapa de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de las bandas roja e infrarroja cercana (bandas 3 y 4, respectivamente). Todos estos productos se suministraron al servidor de la herramienta LINHE.

La distribución de alturas derivadas de los modelos digitales extraídos de los datos LIDAR se relacionó con las distribuciones de alturas, diámetros normales, áreas basimétricas y volúmenes obtenidos en los inventarios de campo del pinar de Valsaín. Para ello se realizó una comparación con los datos de campo de diámetro, altura total, altura de la copa, posición del árbol, área basimétrica, volumen de madera y densidad de la cubierta vegetal. Se obtuvo un modelo digital de vegetación a partir de los datos LIDAR. La siguiente figura muestra la ortofoto de una zona del pinar de Valsaín, superpuesta sobre una clasificación de NDVI de la zona.

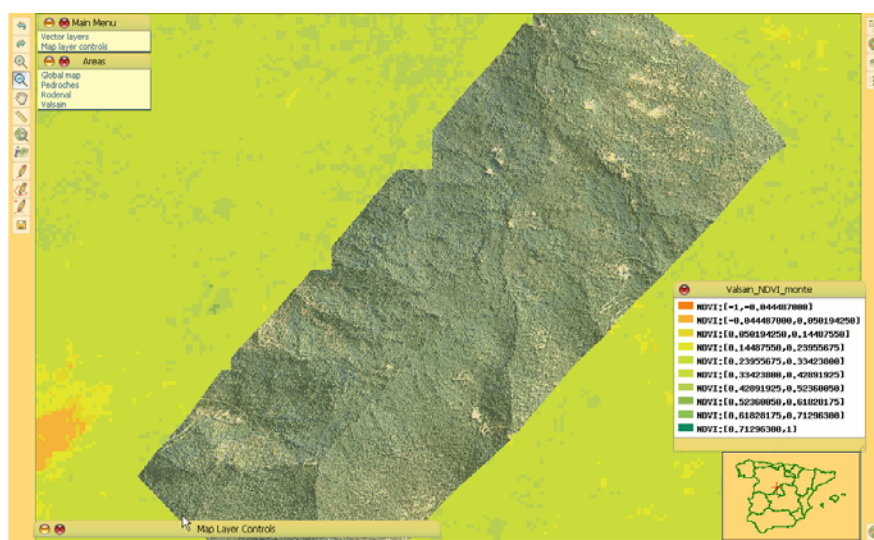


Figura 5: Ortofoto del pinar de Valsaín, superpuesta sobre una clasificación de NDVI.

Los primeros resultados de esta comparación sugieren una suficiente coherencia entre los datos procedentes del sensor LIDAR y los obtenidos por medición directa en campo. Se observaron diferentes valores de altura media en las distintas zonas de muestreo. Los valores de alturas entre 0 y 10 m, esperables en zonas de regeneración o en aquellas con vegetación heterogénea en densidad. Los histogramas de alturas LIDAR mostraron gran semejanza con los histogramas de las variables medidas en el inventario de campo.

5.4 Visor LINHE

Un elemento importante de la herramienta LINHE es el visor prototipo LINHE que permite un acceso dinámico a los datos georeferenciados. El visor está diseñado con acceso simultáneo a los resultados temáticos, consulta de propiedades, herramientas de edición y de impresión de resultados cartográficos.

El visor es una herramienta muy útil para la gestión y catalogación de datos ya que permite visualizar simultáneamente un elevado número de capas de información (vector y ráster), de los distintos sensores empleados, con diferentes formatos y resoluciones espaciales. También es una herramienta válida para la homogeneización y la estandarización tal y como se ha aplicado en la Directiva Inspire (2007). Puede ser considerado como un complemento útil a herramientas de análisis más complejas utilizadas en teledetección (programas comerciales GIS). El visor ofrece la posibilidad de i) realizar análisis de datos, ii) visualizar los metadatos de las capas de información utilizando el estándar ISO 19115, iii) añadir nuevas capas vector, iv) medir distancias y áreas, y v) generar mapas en formato pdf. para su impresión. La arquitectura del visor está basada en Open Source, en servidores geográficos y elementos del cliente, y se ha desarrollado sobre un software *libre* y de *código fuente abierto*, por lo tanto no se ha necesitado licencia. Su uso es intuitivo y no se necesita ningún conocimiento previo de GIS. La única instalación de software requerida antes de trabajar con el visor LINHE es el acceso a la red. El visor puede extraer y mostrar en pantalla toda la información contenida en cada punto.

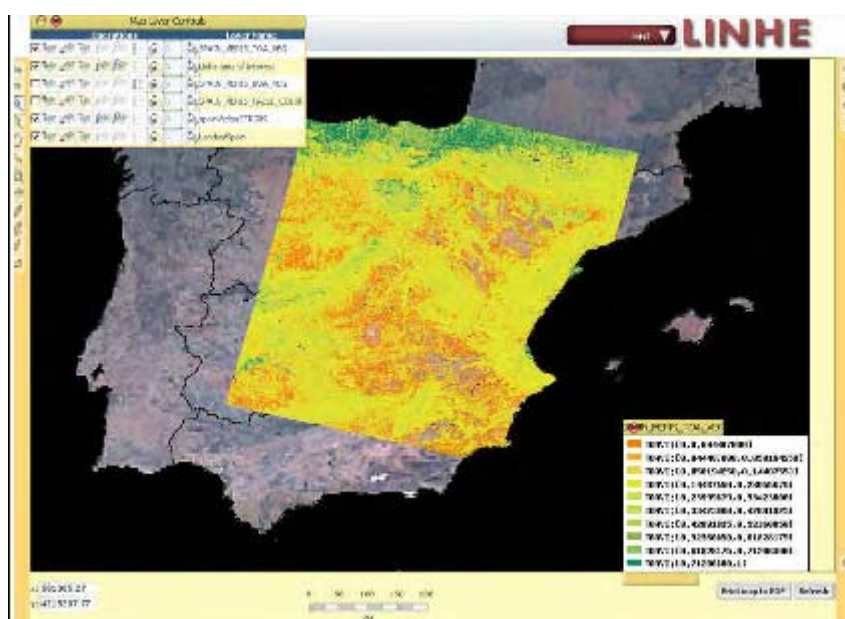


Figura 6: Aspecto general del visor LINHE, con un mosaico MERIS de España de fondo y, sobre él, una clasificación de uno de los índices de vegetación de MERIS (TOAVI: Top of Atmosphere Vegetation Index)

6. DISCUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Todo el conjunto de procesos y técnicas para el procesado y análisis de datos, las metodologías de captura de información en campo, y el visor se engloban dentro de la "herramienta LINHE".

Los distintos tipos de datos, las metodologías y técnicas de procesado desarrolladas y contrastadas en el ámbito del proyecto LINHE, y la variedad de ecosistemas estudiados aportan información muy valiosa para el análisis y gestión de ecosistemas forestales de



diversas características. El visor permite complementar y cohesionar los distintos datos y técnicas de procesado, ya que facilita el manejo y visualización, de forma integrada, de las capas de información generadas como consecuencia de los distintos análisis, permitiendo disponer de un catálogo completo y bien documentado. La “herramienta LINHE” permite la generación y el manejo integrado de capas de información con referencia espacial de muy diversas características, para facilitar la gestión y la planificación forestal.

Entre los resultados del proyecto se ha elaborado una propuesta metodológica para el empleo de la “herramienta LINHE” en la gestión forestal, atendiendo a los datos a emplear y su procesado. Se ha establecido una propuesta para cada zona de estudio, ya que son ecosistemas muy distintos, con necesidades de gestión bien diferenciadas, así como ciertas pautas metodológicas a tener en cuenta para el empleo del visor.

El proyecto LINHE se ha desarrollado durante dos años, pero la toma de datos ha ocupado una parte importante de ese tiempo. LINHE ha producido resultados interesantes para la gestión forestal y para avanzar en la integración de los distintos tipos de datos, pero es necesario continuar trabajando para profundizar en los análisis y en el estudio de las correlaciones entre los distintos datos.

Hasta el momento, los datos LiDAR se han empleado para la generación de modelos de alturas para la estimación de parámetros forestales, pero es necesario seguir avanzando en el empleo de estos datos en la elaboración de inventarios forestales. El análisis de los valores de intensidad captados por LiDAR es un campo de investigación muy interesante que no se ha tratado en este proyecto. El empleo del LiDAR terrestre se quiere incluir en el trabajo futuro, ya que puede aportar resultados muy interesantes. Nuevas mejoras para el visor LINHE están también planeadas para las siguientes fases del trabajo, que incluyen la posibilidad de descarga de datos, la instalación del visor sobre PDA y la exportación de capas a formato “shapefile”.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio* (MITYC) la financiación concedida para el desarrollo del proyecto LINHE (proyecto Tractor FIT-330221-2006-10).

REFERENCIAS

- Brandtberg, T., 2007. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61(5), 325-340.
- European Parliament and The Council of The European Union, 2007. Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*, L108. http://www.ec-gis.org/inspire/directive/l_10820070425en00010014.pdf (Last accessed: July-2008).
- Goodwin, N., Coops, N., Culvenor, D., 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude, *Remote Sensing of the Environment* 103(2), 140-152.
- Holmgren, J., Johansson, F., Olofsson, K., Olsson, H., Glimskär, A., 2008. Estimation of crown coverage using airborne laser scanning. *Proceedings of SilviLaser 2008: 8th*



international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory (Edinburgh, UK, 17-19 septiembre 2008).

- Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysal, U., Pitkänen, J., Maltamo, M., 2005. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, VolXXXVi-8/W2.
- Key, C.H., and Benson, N.C., 1999. The Normalized Burn Ratio (NBR): a Landsat TM Radiometric Measure of Burn severity, *United States Geological Survey* (USGS).
- Kraus, K., and Pfeifer, N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 193–203.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., and Harding, D. J., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, 52, 19 – 30.
- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G. G., and Shugart, H. H., 1999. Surface Lidar remote sensing on basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67, 83 – 98.
- Lefsky, M.A., Harding, D.J., Keller, M., Cohen, W.B., Carabajal, C.C., Espirito-Santo, F.D.B., Hunter, M.O., Oliveira Jr., R., 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters*, 32, L22S02, doi:10.1029/2005GL023971.)
- Lucas, R., Lee, A., Armston, J., Breyer, J., Bunting, P., Carreiras, J., 2008. Advances in forest characterisation, mapping and monitoring through integration of LiDAR and other remote sensing datasets. En *Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory* (Edinburgh, UK, 17-19 septiembre 2008)
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, A., and Söderman, U., 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Volume 19, Number 6 / December 2004, pp 482 – 499.
- Packalén, P., Pitkänen, J., Maltamo, M., 2008. Comparison of individual tree detection and canopy height distribution approaches: a case study in Finland. *Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory* (Edinburgh, UK, 17-19 septiembre 2008).
- Parker R., and Evans D., 2004. An Application of LiDAR in a Double-Sample Forest Inventory. *Western Journal of Applied Forestry*, Volume 19, Number 2, April 2004, 95–101.
- Parker, R., Evans, D., 2008. LiDAR forest inventory with single-tree, double- and single-phase procedures. *Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory* (Edinburgh, UK, 17-19 septiembre 2008).
- Popescu, S., Zhao, K., 2008. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees, *Remote Sensing of the Environment* 112(3), 767-781
- Riaño, D., Meier, E., Allgower, B. and Chuvieco, E., 2002. Generation of vegetation height, vegetation cover and crown bulk density from airborne laser scanning data. In: Viegas (Ed.). *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Millpress, Rotterdam, ISBN: 90-77017-72-0.
- Riaño, D., Meier, E., Allgower, B., Chuvieco, E., and Ustin, S. L., 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(2), 177 – 186.



- Riaño, D. Chuvieco, E., Condés, S., González-Matesanz, J., Ustin, S.L., 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus Sylvestris* from Lidar. *Remote Sensing of Environment*, 92, 345 – 352.
- Riaño, D. Chuvieco, E., Ustin, S.L., Salas, J, Rodríguez-Pérez, J.R., Ribeiro, L.M., Viegas, D.X., Moreno, J.M. and Fernández, 2007. Estimation of shrub height for fuel-type mapping combining airborne LiDAR and simultaneous color infrared ortho imaging. *International Journal of Wildland Fire* 16, 341 – 348.
- Roberts, S.D., Dean, T.J., Evans, D.L., McCombs, J.W., Harrington, R.L. and Glass, P.A., 2005. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. *Forestry Ecology and Management*, 213. 54 – 70.
- Roldán-Zamarrón, A., Merino-de-Miguel, S., González-Alonso, F., García-Gigorro, S. and Cuevas, J.M., 2006. Minas de Riotinto (south Spain) forest fire: Burned area assessment and fire severity mapping using Landsat 5-TM, Envisat-MERIS, and Terra-MODIS postfire images, *Journal of Geophys. Res.*, 111, G04S11, doi: 10.1029/2005JG000136.
- Rombouts, J., Ferguson, I.S., Leech, J.W., 2008. Variability of LiDAR volume prediction models for productivity assessment of radiata pine plantations in South Australia. *Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory* (Edinburgh, UK, 17-19 septiembre 2008).
- Shenk, J. and Westerhaus, M.O., 1995. Analysis of agriculture and food products by Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Monograph NIR Systems*. p. 124.
- Sithole, G. and Vosselman, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59 (1-2): 85 – 101.
- StOnde, B.A. and Achaichia, N., 2001. Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXIV-3, W4 Annapolis, MD, October 22-24.
- Streutker, D.R. and Glenn, N.F., 2006. LiDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights. *Remote Sensing of Environment* 102: 135 – 145.
- Tickle, P.K., Lee, A., Lucas, R.M., Austin, J., Witte, C., 2006. Quantifying Australian forest and woodland structure and biomass using large scale photography and small footprint Lidar. *Forest Ecology and Management*, 223 (1-3), 379-394.
- Williams, P.C. and Norris, K., 2001. Near-Infrared technology in the agricultural and food industries, 2nd edition. *American Association of Cereal Chemists*, Inc. St. Paul, Minnesota, USA.
- Wulder, M., Han, T.; White, J., Sweda, T. & Tsuzuki, H., 2007. Integrating profiling LIDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization, *Remote Sensing of the Environment* 110(1), 123-137.