

## **Análisis comparativo del potencial del ALS y TLS en la caracterización estructural de la masa forestal basado en voxelización**

**Crespo-Peremarch, P., Ruiz, L. A.**

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022-València, España.  
pabcrepe@cgf.upv.es, laruiz@cgf.upv.es

**Resumen:** En las últimas décadas se ha demostrado la eficiencia en la caracterización del dosel arbóreo y la estructura forestal mediante ALS (*Airborne Laser Scanning*) y TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), presentando cada uno limitaciones en diferentes zonas de la estructura forestal debido a la oclusión. En este estudio se efectuó una comparación de las alturas del dosel obtenidas por ambos sensores en la Sierra de Espadán (Castellón); se estudió la penetrabilidad en los diferentes estratos verticales (terreno, sotobosque, base dosel, estructura interna, ápice) mediante el análisis de densidades dentro de vóxeles; y se estudiaron las relaciones entre dichas densidades y las características de las parcelas. Con ALS se obtuvieron alturas de dosel menores que con TLS (siendo el RMSE de la diferencia igual a 2,10 metros), debido a su menor densidad y, por tanto, menor probabilidad de registrar la altura máxima. Las mayores densidades del ALS se localizaron en el ápice y el terreno, mientras que las del TLS en el sotobosque y especialmente en el terreno. El TLS ha demostrado su potencial para el inventariado de parcelas forestales, aunque podría complementarse con datos UAS para registrar las zonas superiores de la estructura con una mayor densidad que el ALS.

**Palabras clave:** LiDAR, láser escáner, estructura forestal, sotobosque, terreno, dosel arbóreo.

### ***Comparative analysis of ALS and TLS potential for the structural characterization of forest mass by voxelization***

**Abstract:** During last decades, the efficiency of ALS (*Airborne Laser Scanning*) and TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) to characterize the canopy and forest structure has been demonstrated. Each of them has limitations in different forest structure strata due to occlusion. In this study, a comparison of the canopy height registered by both sensors was carried out in Sierra de Espadán (Spain); penetrability in different vertical strata (terrain, understory, canopy base, internal structure, top) was studied through the analysis of densities within the voxels; as well as the relationship between densities and plot features. ALS registered lower canopy heights than TLS (being the RMSE of the difference 2.10 meters), due to its lower density, and therefore the likelihood of registering the maximum height is lower. Highest densities of ALS are located at the top of the canopy and terrain, whereas TLS densities are principally at terrain and understory. The potential of TLS for forest inventory at plot level has been proven, although it could be complemented with UAS data, in order to register upper vegetation strata with a higher density than ALS.

**Keywords:** LiDAR, laser scanning, forest structure, understory, terrain, canopy.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La caracterización de la estructura forestal permite entre otras cosas estudiar la reforestación, el hábitat de la fauna o el comportamiento de un incendio forestal (Hill y Broughton, 2009). Los sistemas LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportados (*Airborne Laser Scanning*, ALS) vienen empleándose satisfactoriamente desde hace décadas para la extracción de la estructura vertical de la vegetación, puesto que proporcionan información sobre la distribución en altura de los diferentes estratos verticales (Ruiz *et al.*, 2016). El láser escáner terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) presenta unas densidades mucho más elevadas que el ALS, permitiendo un estudio más detallado de la estructura (Vierling *et al.*, 2013).

En estudios previos se han analizado las diferencias entre ALS y TLS para estimar variables como la altura del dosel, biomasa o volumen (Hilker *et al.*, 2010), concluyendo que el TLS puede ser un buen complemento

o alternativa al ALS. En Chasmer *et al.* (2006) se comparó la distribución de densidades ALS y TLS en diferentes alturas de la copa para diferentes especies, obteniendo el primero mayores frecuencias en las partes elevadas, y el segundo en las partes inferiores de la copa, debido a las oclusiones.

Desde un punto de vista estructural, las áreas forestales se pueden dividir en diferentes estratos verticales: ápice de la copa, zona interna de la copa, base de la copa, sotobosque y terreno. La altura de cada uno de estos estratos es variable debido a la heterogeneidad de la estructura forestal, especie o edad. Por ello, es importante hacer un estudio de penetración del ALS y TLS en los diferentes estratos, en lugar de por alturas.

Los objetivos de este trabajo son: (i) realizar un análisis comparativo de las alturas de las copas obtenidas mediante ALS y TLS; (ii) analizar la distribución de densidades de puntos ALS y TLS en diferentes estratos de la vegetación (ápice de la copa, zona interna copa, base de la copa,

sotobosque y terreno); y (iii) relacionar la distribución de densidades con respecto a factores estructurales como la biomasa, densidad de pies, altura dominante o especie.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra en el parque natural de la Sierra de Espadán, en la provincia de Castellón, España. Es una zona montañosa con laderas escarpadas y presencia de terrazas artificiales. La especie predominante es el *Pinus halepensis* con gran presencia de sotobosque, aunque también hay presencia de *Pinus pinaster* y *Quercus suber* en gran medida.

Durante el mes de septiembre 2015 se llevaron a cabo los trabajos de campo en 80 parcelas de 15 metros de radio distribuidas aleatoriamente a lo largo de la zona de estudio (3741 ha). En ellas se midieron los diámetros a la altura de pecho (DBH) de todos los pies con un DBH mayor que 5 cm y la altura del ápice para los siete pies con mayor DBH dentro de cada parcela. A partir de estos datos y de las ecuaciones alométricas de Montero *et al.* (2005) se estimó la biomasa área (AGB) y la altura dominante a partir de la media de las lecturas. De cada parcela también se anotó la especie dominante, la cobertura aproximada de sotobosque, y la pendiente.

Los datos ALS se tomaron de forma simultánea y cubren toda la zona de estudio. Sus características se muestran en la Tabla 1.

Los datos TLS fueron igualmente registrados al mismo tiempo y están disponibles para 29 de las 80 parcelas de trabajo (Tabla 1). Para cada una de estas parcelas se realizaron nueve escaneos.

**Tabla 1.** Características del ALS y TLS.

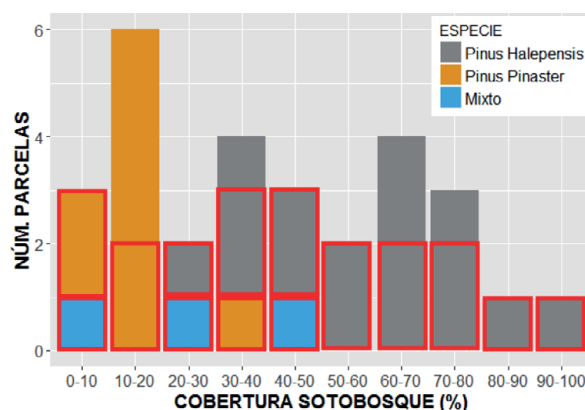
	ALS	TLS
Sensor	LM6800	FARO FOCUS 3D 120
Precisión	0,24 m (H), 0,15 m (V)	2 mm a 25 m
Puntos por parcela	24306	98919896
Densidad media puntos	34,39 m <sup>-2</sup>	139943,03 m <sup>-2</sup>
Retornos	7	1
Frecuencia de pulso	300 kHz	97 Hz
Longitud de onda	1550 nm	905 nm
Divergencia del haz	≤ 0,5 mrad	0,19 mrad

### 2.1. Selección de la muestra

Teniendo en cuenta la especie dominante y la cobertura de sotobosque en cada una de las parcelas, se extrajo una submuestra con la que llevar a cabo el estudio. Se seleccionaron un máximo de dos parcelas de cada especie dominante por cada intervalo de 10% de cobertura de sotobosque (Figura 1), con el fin de homogeneizar las tipologías de parcelas en la muestra. De esta manera se trabajó con un total de 21 parcelas.

### 2.2. Comparación de alturas

El primer paso fue la normalización de las alturas a partir de un modelo digital del terreno (MDT). A continuación, se realizó una comparación de las alturas de la vegetación obtenidas tanto por el ALS como por el TLS. Sólo se tuvieron en cuenta los puntos por encima de 2 metros, que es la altura aproximada del instrumento TLS, con el fin de analizar aquellos ápices con una altura superior al mismo. Esta comparación se realizó a nivel de píxel. El tamaño de píxel se determinó a partir de la densidad de puntos de ambos sensores, con el criterio de minimizar el número de píxeles vacíos, estableciéndose en 0,75 metros. A partir de la diferencia de alturas para cada una de las 21 parcelas se calculó el error medio cuadrático (RMSE).



**Figura 1.** Representación de las 29 parcelas con datos TLS según la especie dominante y la cobertura de sotobosque. En rojo se enmarca la proporción de parcelas seleccionadas para el estudio.

### 2.3. Cálculo de densidades por estratos

El primer paso fue diferenciar cada uno de los diferentes estratos (ápice, zona interna, base de la copa, sotobosque y terreno), los cuales se describen en la Figura 4.

El terreno se determinó como todos aquellos puntos con una altura igual o menor a 7,5 cm (mitad de la precisión en Z del ALS). El ápice corresponde con aquellos puntos con mayor cota dentro de cada píxel. En este caso se puso la condición de cota mínima de 2 metros. Tanto el sotobosque como la base de la copa son más complejos de extraer, por lo que se seleccionaron manualmente. En el sotobosque, se excluyeron automáticamente todos aquellos puntos menores de 15 cm, al considerarse puntos del terreno o de estratos herbáceos inferiores. Por último, la estructura interna de la copa se extrajo calculando la altura intermedia entre la base de la copa y el ápice.

El siguiente paso fue la voxelización de los datos. Este proceso consiste en agrupar todos los puntos que se encuentran dentro de un vóxel (e.g. prisma rectangular). Se extrajo la densidad de puntos en el vóxel. Al igual que el tamaño de píxel, el del vóxel se estableció en 0,75 metros para los tres ejes.

Conociendo qué puntos corresponden a cada estrato, se pudo también conocer que vóxeles correspondían a cada estrato y calcular su densidad.

Debido a la disparidad de densidades entre TLS y ALS se decidió trabajar con densidades relativas con respecto a la columna de vóxeles. Para ello, la densidad de puntos de cada vóxel se dividió entre la densidad de toda la columna, siendo estas densidades comparables.

Con estas densidades relativas para cada estrato se calculó la media de cada estrato para cada parcela.

Seguidamente, se calculó la ratio entre la densidad relativa del TLS y del ALS para cada columna de vóxeles y estrato.

### 2.4. Relación entre densidades y características de las parcelas

Con el objetivo de analizar qué parámetros afectan a la penetrabilidad de los haces láser del TLS y ALS, se estudió una posible relación entre las densidades relativas para cada uno de los estratos con las características de cada una de las parcelas (especie dominante, cobertura sotobosque, pendiente, número de pies, biomasa aérea y altura dominante).

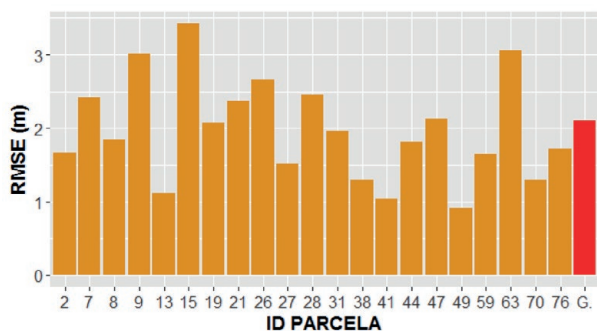
Para ello se generaron diferentes modelos de regresión lineales, que fueron evaluados mediante validación cruzada y dividiendo la muestra en 10 grupos. Estos modelos se generaron para cada sensor y estrato, en el que la densidad relativa fue la variable dependiente y las variables forestales de cada parcela las variables independientes. Se obtuvo el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y las variables seleccionadas por el método paso a paso hacia adelante para analizar las relaciones existentes.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Alturas estimadas

En la Figura 2 se muestra el RMSE calculado a partir de la diferencia de alturas máximas superiores a 2 metros obtenidas con ALS y TLS para cada parcela y a nivel global. Estos valores se encuentran entre los 0,91 y 3,42 metros, con un valor de 2,10 metros para el conjunto de parcelas.

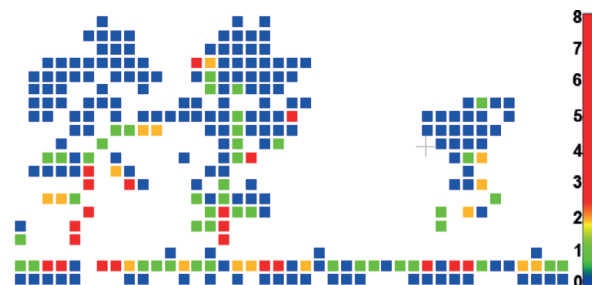
La media de las diferencias entre ALS y TLS dio un resultado negativo en todos los casos, por lo que las alturas TLS suelen ser superiores a las del ALS.



**Figura 2.** RMSE en metros de la diferencia de alturas de la vegetación extraídas por ALS y TLS para cada una de las parcelas y a nivel global.

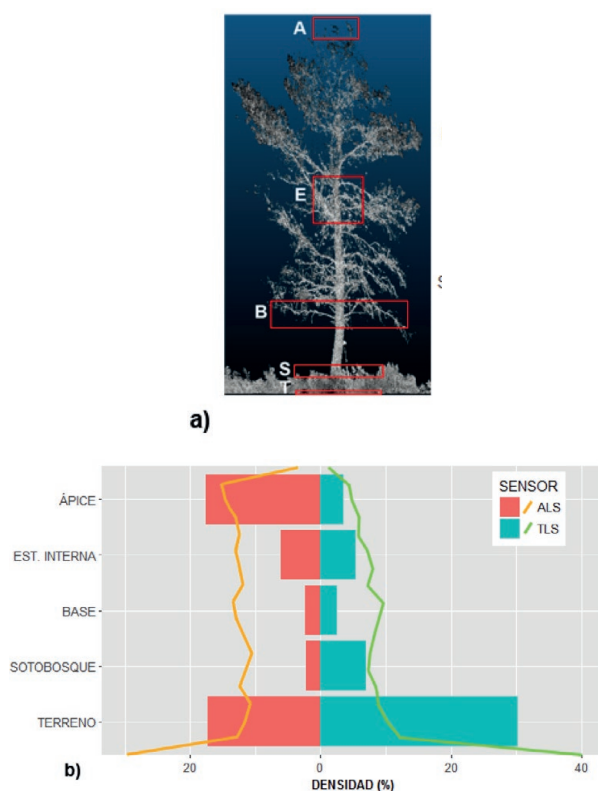
### 3.2. Comparación de densidades

En la Figura 3 se muestra la ratio entre la densidad relativa TLS y ALS para cada vóxel dentro de una parcela. Se puede observar cómo las mayores densidades TLS se encuentran en zonas más inferiores, densas y próximas al instrumento como sotobosque, fustes o partes del dosel.



**Figura 3.** Representación de los vóxeles que muestran la ratio entre la densidad relativa TLS y ALS. Los vóxeles con un valor menor que 1 (azul) son aquellos con una mayor densidad ALS, y los mayores que 1 tienen mayor densidad TLS.

En la Figura 4 se muestra la comparación de densidades relativas entre ALS y TLS para cada uno de los 5 estratos verticales y a nivel de vóxel. Se observa claramente como el ALS tiene mayor densidad en el ápice y terreno, mientras que para el TLS la densidad es mayor en el sotobosque y especialmente en el terreno.



**Figura 4.** (a) Descripción gráfica de los 5 estratos verticales: (A) ápice, (E) estructura interna, (B) base de la copa, (S) sotobosque, y (T) terreno; y (b) comparación de las densidades relativas entre ALS y TLS por estratos (barras) y a nivel de vóxel (curvas).

### 3.3. Relación entre densidades y características de las parcelas

En la Figura 5 se muestran las variables que afectan a la densidad de puntos dependiendo del estrato y sensor, y su correlación. Excepto el ápice para el ALS y la base de la copa para el TLS, existe una correlación entre ciertas variables de estructura de las parcelas y las densidades.

### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la Figura 2 se muestra cómo el RMSE global es de 2,10 metros, y los resultados estadísticos indican que las alturas extraídas a partir del ALS son inferiores a las del TLS.

El ALS tiene una menor densidad y, por lo tanto, la probabilidad de que un haz intersecte el ápice del árbol es menor (Zimble *et al.*, 2003). Por ello, los primeros retornos ALS suelen estar algunos metros por debajo del ápice. Sin embargo, el TLS tiene una mayor densidad de puntos, pero la oclusión para la extracción del ápice es mucho mayor (Figura 4).

Como se aprecia en la Figura 3, las mayores densidades TLS se concentran en el sotobosque, fuste, y partes inferiores del dosel, que son las más cercanas al instrumento. Se aprecian algunas zonas internas del dosel con mayores densidades TLS, posiblemente debido a la presencia de elementos más densos como ramas más gruesas. En este ejemplo, y al contrario de lo que se observa en la Figura 4, la densidad ALS es mayor en el terreno. Esto es debido a que la parcela de la Figura 3 tiene una alta cobertura de sotobosque (90%) y, como indican los modelos de la Figura 5, esto afectó a la densidad TLS en el terreno. Debido a su toma cenital, el ALS registra mayores densidades en las partes elevadas. En la Figura 4 se observa que el ALS presenta mayores densidades en el ápice y el terreno, al ser el ápice el primer objeto que intersectan los haces y el terreno un objeto compacto, que no deja pasar la energía y donde no hay cobertura de vegetación recibe el total de ella. Sin embargo, las densidades relativas son similares a las del TLS en la zona interna y base de la copa. Las densidades en el sotobosque por parte del ALS son pequeñas debido a la oclusión producida por el dosel.

El TLS registra sus mayores densidades en el terreno y sotobosque, al encontrarse más próximos al instrumento. Por el contrario, las densidades son pequeñas en el ápice, debido a la oclusión del dosel.

La Figura 5 muestra una correlación elevada entre las características estructurales de las parcelas y la densidad de puntos en la zona interna con ALS. La penetrabilidad del ALS en este estrato se ve afectada por la altura dominante y la especie puesto que, dependiendo de éstas, la copa se encuentra más o menos abierta. En cuanto al TLS, la correlación es alta para los estratos de sotobosque y terreno. El registro del sotobosque depende de la biomasa aérea que, cuanto mayor es, menor es la densidad de puntos en el sotobosque. En cuanto al terreno, la densidad depende de la especie y la cobertura de sotobosque, ya que este puede originar oclusión y varía según la especie dominante, siendo su presencia muy

elevada en parcelas de *Pinus halepensis*. Por el contrario, no existe correlación en la densidad del ápice con ALS y la base del dosel con TLS, ya que estos estratos pueden registrarse desde los respectivos sensores sin ninguna oclusión. Estos resultados permiten hacer una previsión de la penetrabilidad de los haces a través de los diferentes estratos según las características o el tipo de bosque.

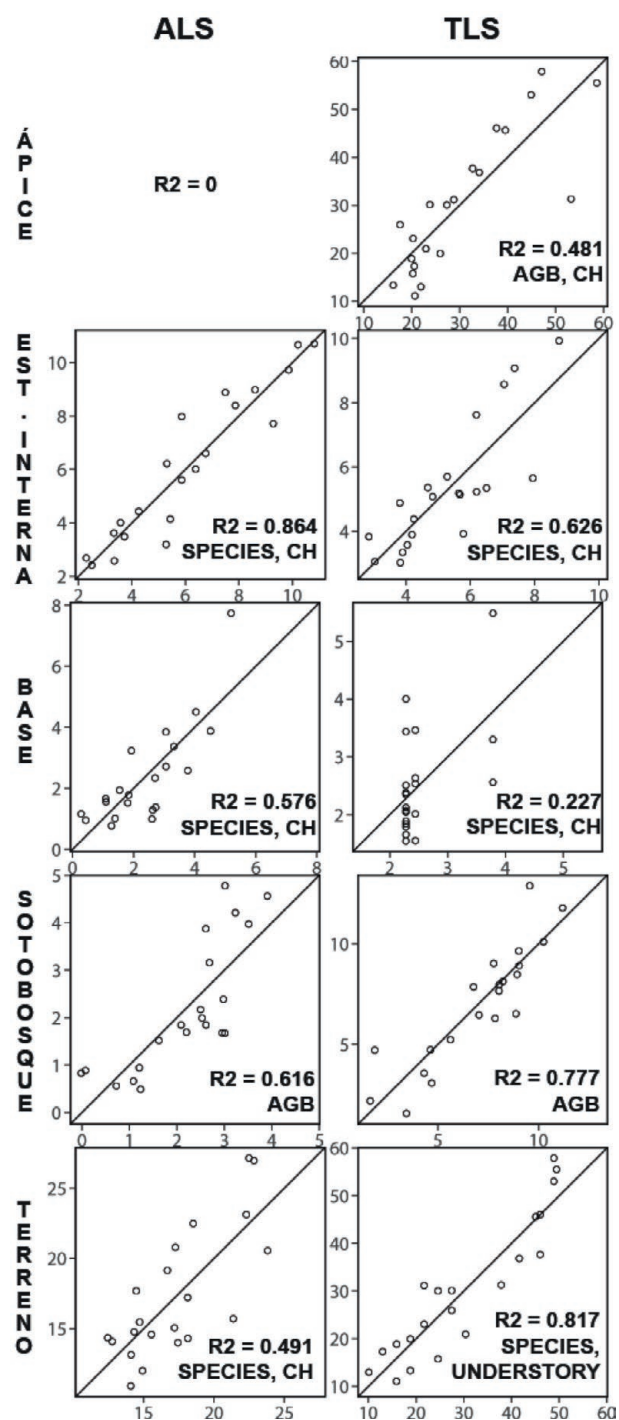


Figura 5. Gráficas de los modelos de regresión lineales para cada sensor y estratos verticales, donde se representan las densidades calculadas en el eje de las X y las observadas en las Y. También se incluye la R<sup>2</sup> del ajuste y las variables seleccionadas.

Los datos ALS han demostrado que pueden utilizarse para el inventariado de las parcelas debido a su alta densidad y penetrabilidad, especialmente en las partes inferiores de la estructura forestal. Sin embargo, su aplicación presenta un coste elevado con respecto al TLS. El uso de UAS para registrar con más precisión las zonas más elevadas es una alternativa para complementar los datos, ya que permiten tomas cenitales como el ALS, pero con una mayor densidad de puntos. Estos datos permitirían obtener un inventariado preciso sobre el que se podrían tomar nuevas medidas no planificadas en el momento de salir a campo.

Además, el ALS también ha demostrado su capacidad para caracterizar el terreno, siendo crucial para cualquier normalización de alturas.

Por último, es posible hacer una previsión de la densidad de puntos que registra cada instrumento en los estratos con mayor oclusión dependiendo de las características de la zona de estudio. La aplicación conjunta del TLS y ALS en las tareas de inventariado de las parcelas requeriría de la validación concreta de las variables de estudio.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido co-financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER en el marco del proyecto CGL2016-80705-R.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Chasmer, L., Hopkinson, C., Treitz, P. 2006. Investigating penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. *Can. J. Remote Sens.*, 32(2), 116-125.
- Hilker, T., van Leeuwen, M., Coops, N.C., Wulder, M.A., Newnham, G.J., Jupp, D.L., Culvenor, D.S. 2010. Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand. *Trees*, 24(5), 819-832.
- Hill, R.A., Broughton, R.K. 2009. Mapping the understorey of deciduous woodland from leaf-on and leaf-off airborne LiDAR data: A case study in lowland Britain. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 64(2), 223-233.
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles*. Madrid, España: INIA.
- Ruiz, L.A., Recio, J.A., Crespo-Peremarch, P., Sapena, M. 2016. An object-based approach for mapping forest structural types based on low-density LiDAR and multispectral imagery. *Geocarto Int.*, 1-15.
- Vierling, L.A., Xu, Y., Eitel, J.U., Oldow, J.S. 2013. Shrub characterization using terrestrial laser scanning and implications for airborne LiDAR assessment. *Can. J. Remote Sens.*, 38(6), 709-722.
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., Gerard, P.D. 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sens. Environ.*, 87(2), 171-182.