



Factibilidad técnico-económica de implementar LiDAR en una empresa forestal

Technical and economic feasibility of implementing LiDAR in a forest company

Rosa M. Alzamora^{1,2*}, Julio César Becker^{1,3}, Manuel Escudero⁴ y Antonio Alfonso Pinto Rodríguez⁵

¹ Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente. Concepción, Chile.

² Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (Cenamad). Santiago, Chile.

³ Forestal Mininco SA, CMPC, Los Ángeles, Chile.

⁴ Empresa Cartomapa

⁵ Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía. Departamento de Producción Vegetal. Concepción, Chile.

* Autor de correspondencia. ralzamora@udec.cl

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue documentar el proceso de toma de decisión de una empresa forestal para implementar la tecnología *Light Detection and Ranging* (LiDAR) en aplicaciones para sistemas de información cartográfica y de inventario. El análisis consistió en comparar el uso de datos obtenidos con LiDAR, *vs* técnicas fotogramétricas y contra el uso de datos obtenidos con restitución de imágenes satelitales, bajo dos enfoques: i) precisión altimétrica en la determinación de perfiles de terreno, y ii) precisión planimétrica en la determinación de perímetros y áreas. Como resultado, se obtuvo que LiDAR mostró mayor precisión en el análisis altimétrico; no obstante, LiDAR no generó diferencias significativas, respecto al método fotogramétrico, en el análisis planimétrico. La evaluación económica de incorporar LiDAR para planificar faenas de cosecha, caminos y establecimiento de plantaciones, resultó rentable con un valor actual neto de USD 2 095 000, a una tasa de descuento de 10%.

PALABRAS CLAVE: cartografía, fotogrametría, imagen láser, planificación forestal.

ABSTRACT

This paper reports the decision-making process of a forest company to implement LiDAR technology for mapping and inventory issues. The methodology consisted in comparing the accuracy obtained by using LiDAR-derived data, with that obtained by both photogrammetry and satellite imagery in two applications: i) altimetric accuracy on profile estimation, and ii) planimetric accuracy on perimeter and area estimation. As a result, LiDAR showed greater accuracy than alternative methods in the altimetric analysis; however, LiDAR did not show significant differences with the photogrammetric method in the planimetric analysis. The economic evaluation of incorporating LiDAR for planning harvesting, forest tracks and plantations establishment, resulted profitable with a net present value of USD \$ 2 095 000, at a discount rate of 10%.

KEYWORDS: mapping, photogrammetry, laser imaging, forest planning.

INTRODUCCIÓN

Las empresas forestales requieren de información precisa y actualizada de los recursos forestales que manejan para optimizar la planeación de las actividades relacionadas con el manejo forestal sustentable. La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) ha demostrado ser de gran apoyo para la generación de información para dichos objetivos. LiDAR se basa en sensores láser, capaces de generar datos georeferenciados con mayor rapidez y precisión que métodos tradicionales como la restitución aerofotogramétrica, la restitución satelital o los levantamientos topográficos (Renslow, Greenfield y Guay, 2000; Abellán, Calvet, Vilaplana y Blanchard, 2010; González-Ferreiro, Diéguez-Aranda y Miranda, 2012; Ortiz-Reyes *et al.*, 2015). LiDAR ha sido ampliamente aplicado en el levantamiento de datos de inventario forestal. Sin embargo, también se ha extendido a la evaluación de calidad de madera, así como a estudios ecológicos que analizan los procesos de transpiración de las plantas y la diversidad de microhábitats (Dassot, Constant y Fournier, 2011).

La restitución fotogramétrica es un proceso basado en técnicas estereoscópicas e imágenes generadas a partir de un vuelo fotogramétrico (Sifuentes y Vásquez, 1997). La restitución satelital, en cambio, se realiza sobre imágenes satelitales; así, por ejemplo, el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) corresponde a información digital altimétrica obtenida mediante interferometría RADAR espacial (Sala, Matko, Falk y Grings, 2014). Estos dos métodos generan información de alta precisión; no obstante, Lorenzo, Iseburg, Arbelo y Alonso-Benito (2012) señalan que a diferencia de la tecnología LiDAR, dichos métodos no pueden representar la superficie del relieve en un área con vegetación densa y pendiente elevada, donde el suelo queda oculto. Los autores indican, además, que LiDAR es más preciso que la fotogrametría para generar datos altimétricos, permitiendo densidades mayores a 15 m⁻² puntos, aún bajo cobertura arbórea, dando como resultado un modelado más continuo y homogéneo del terreno. Por su parte, Tomé, Sanjuanbenito y Fernández (2013) indican que los sensores LiDAR capturan datos

tridimensionales de terreno y cobertura de forma continua, permitiendo describir con detalle la estructura forestal en cualquier punto del área sobrevolada.

En Chile, Medina (2011) evaluó la exactitud del método LiDAR para estimar la altura de árboles de *Pinus radiata* D. Don. Asimismo, Valencia *et al.* (2014) desarrollaron modelos para estimar la biomasa aérea en bosques de *P. radiata* en la región del Maule, a partir de datos LiDAR.

Las ventajas que tiene el uso de datos LiDAR en aplicaciones forestales es la buena penetración en el dosel, la alta resolución espacial, la generación de información plani-altimétrica y la estimación de algunas variables dasométricas (Falkowski *et al.* 2006). Además, esta tecnología ha mostrado una alta costo-eficiencia para asignar maquinaria en terreno y para operaciones de movimiento de tierra en construcción de caminos. Sin embargo, Ortiz-Reyes *et al.* (2015) señalan que para realizar dichos beneficios se requiere de una resolución adecuada; así, la estimación mejora considerablemente con densidades de puntos del vuelo superiores a los 0,5 m⁻² puntos. Asimismo, Dassot *et al.* (2011) indican que LiDAR presenta muchas ventajas, respecto a los métodos fotogramétricos y a los basados en imagen satelital; sin embargo, debe mejorar en dos aspectos para poder llegar a ser de uso generalizado, primero en el costo de los dispositivos, y luego en el desarrollo de software más eficiente para extraer y manejar la información.

No obstante lo anterior, la decisión de cambiarse a la tecnología LiDAR necesariamente pasa por un análisis técnico y económico que permita revelar los costos y beneficios involucrados en la decisión (Challis, Kokalj, Kincey, Moscrop y Howard, 2008; Ortiz-Reyes *et al.*, 2015).

OBJETIVOS

En el presente trabajo se describe un estudio para evaluar la factibilidad técnico-económica de incorporar la tecnología LiDAR en una empresa forestal para mejorar la precisión en información plani-altimétrica. Los objetivos específicos del estudio fueron: i. comparar la precisión de las estimaciones altimétricas y planimétricas obtenidas con



LiDAR, métodos fotogramétricos, y restitución de imágenes satelitales, y ii. realizar el análisis beneficio-coste de la implementación de LiDAR en una empresa forestal. Las hipótesis de trabajo son: a) que LiDAR presenta ganancias significativas en precisión altiplanimétrica respecto a procesos fotogramétricos y de restitución satelital, y b) que LiDAR genera mayor eficiencia económica que un método fotogramétrico, en estudios altimétricos y planimétricos, requeridos para planificar faenas forestales de cosecha, construcción de caminos y establecimiento de plantaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio altimétrico se realizó en el predio Palinco (1154 ha) y el análisis planímetro en el predio San Antonio (55

ha), ambos ubicados en la Región del Biobío (Chile) y pertenecientes a la empresa Forestal Mininco S.A. El predio Palinco se ubica en la comuna de Yumbel (Latitud: $-37^{\circ} 03' 33''$ Longitud: $-72^{\circ} 41' 58''$), posee un clima cálido y templado, una temperatura y precipitación media anual de $13,4^{\circ}\text{C}$ y 1122 mm, respectivamente (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf y Rubel, 2006). El predio San Antonio se ubica en la Comuna de Hualqui (Latitud: $-37^{\circ} 29' 43''$ Longitud: $-72^{\circ} 43' 31''$), posee un clima templado cálido, con una temperatura y precipitación media anual de 13°C y 1428 mm, respectivamente. La ubicación de los predios, en la Región del Biobío y en Chile, se ilustran en la figura 1.

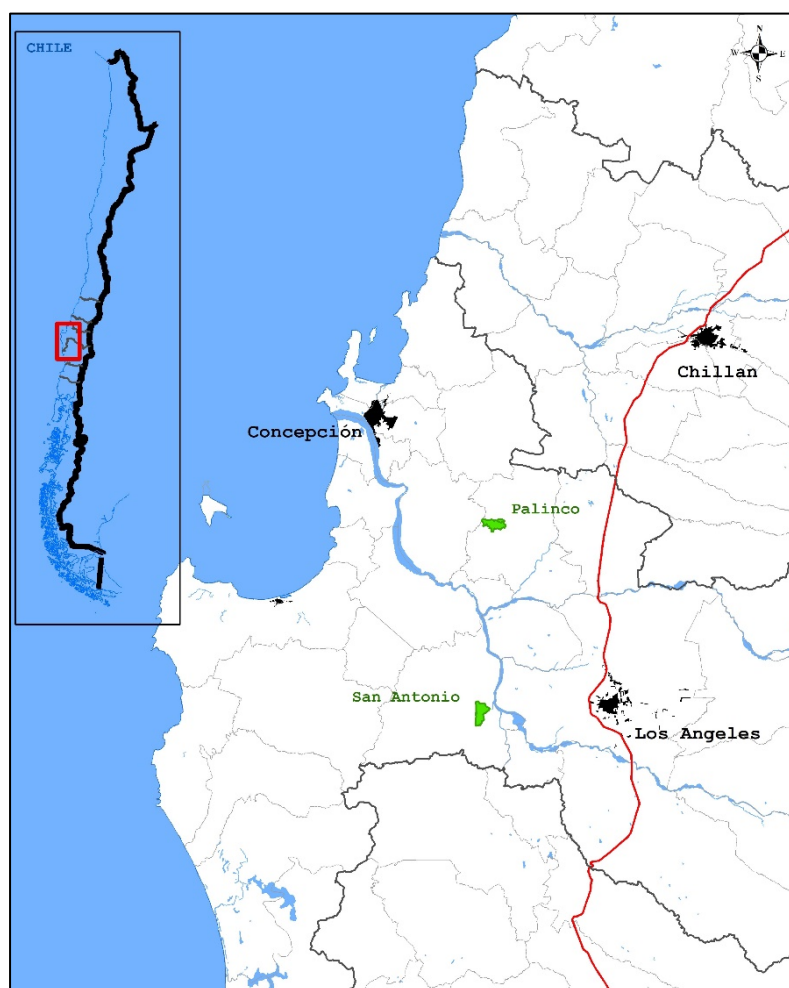


FIGURA 1. Ubicación de los predios Palinco y San Antonio, Región del Biobío, Chile.

Los suelos de ambos predios pertenecen a la Asociación Copiulemu, caracterizada por suelos profundos y formados *in situ* a partir de rocas graníticas de la Cordillera de la Costa. Son suelos de textura francoarcillosa, que permiten un buen desarrollo radicular y con poros abundantes en todo el perfil, por lo que tienen buena capacidad de retención y almacenamiento de agua.

Análisis de precisión altimétrica

Mediante una estación total calibrada marca Trimble, modelo M3, con precisión angular de 5 s y precisión distancia de 3 mm + 1 ppm, desde base geodésica (ETBG), se generaron tres transectos altitudinales de 793 m, 838 m y 898 m de longitud, tomando 81, 89 y 85 puntos por transecto, respectivamente, obteniendo así tres perfiles altitudinales. Estos puntos de referencia con coordenadas x, y, z fueron comparados con aquellos generados por: i) un modelo de elevación del terreno generado a partir de los datos LiDAR, ii) una base SRTM de 30 m $\times$ 30 m, y iii) un proceso fotogramétrico tradicional (PFG). Los datos

fueron derivados a partir de un vuelo LiDAR de la empresa DIGIMAPAS del año 2007-2008

Análisis de precisión planimétrica

El análisis se desarrolló a partir de la generación de cuatro polígonos con límites definidos por caminos forestales. Para generar la información planimétrica de referencia, los polígonos fueron medidos en terreno con GPS submétrico marca Trimble, modelo Pro XRS. Luego, a cada polígono se le generaron dos planimetrías de contraste, una basada en datos LIDAR, y otra en métodos fotogramétricos (rectificación de fotografías aéreas con una resolución de pixel de 1 m), estableciéndose así la superficie total del área estudiada. La figura 2 sintetiza los procesos para el análisis altimétrico y el análisis planimétrico.

Comparación de LiDAR con los métodos tradicionales

Para evaluar el mejor método se utilizó la raíz del error medio cuadrático (RMSE) [1] y como medida de sesgo se utilizó la diferencia agregada (DIFA) [2].

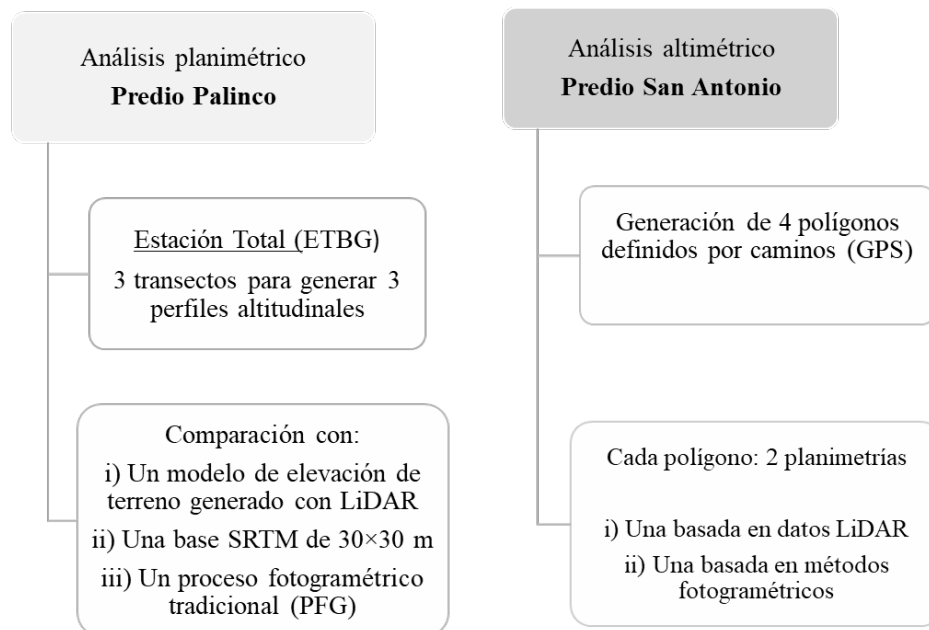


FIGURA 2. Esquema de generación de datos y procesos para en análisis comparativo de LiDAR y métodos tradicionales en análisis altimétrico y planimétrico.



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}(o-a)^2} \quad [1]$$

donde:

$RMSE$ = raíz del error medio cuadrático

o = dato de referencia (estación total, ETBG)

a = valor del sistema alternativo

n = número de observaciones

$$DIFA = \sum \frac{(o-a)^2}{n} \quad [2]$$

donde:

$DIFA$ es la diferencia agregada

a = valor del método alternativo

n = número de observaciones

Además, se corrieron pruebas Fisher (F) y de Student (t) para determinar diferencias de varianza y medias, respectivamente, entre los datos generados por la estación y aquellos derivados de los métodos alternativos.

Análisis Beneficio/Costo de la incorporación de la tecnología LiDAR

La evaluación económica se basó en un flujo descontado de 10 años (2010-2020) donde se evaluó el beneficio neto de incorporar la tecnología LiDAR para fines de planificar faenas de caminos, cosecha y establecimiento de plantaciones. Se compararon ingresos y costos de la condición sin proyecto, donde se opera con un sistema fotogramétrico tradicional, con la alternativa de incorporar LiDAR. Los costos pertinentes por incorporar LiDAR se basaron en una base de datos gráfica de 700 000 ha de predios de la empresa a una escala 1:10 000, que en términos de superficie total cubierta (superficie intrapredial y extrapredial) equivale a 2 000 000 ha.

Los costos y beneficios correspondientes a las condiciones con proyecto y sin él, se presentan en la tabla 1. El valor actual neto (VAN) fue descontado a una tasa de interés de 10%. La pertinencia de los costos y beneficios a considerar se basó en el enfoque de Del Sol (1999). El costo de la adopción de la tecnología es de USD 1,17 millones.

TABLA 1. Resumen de costos y beneficios asociados a las condiciones con y sin proyecto.

Condición con proyecto		Condición sin proyecto	
Descripción costos	Descripción beneficios	Descripción costos	Descripción beneficios
Adquisición de datos LiDAR (DTM).	Reducción en costos de caminos.	Costo de restitución aerofotogramétrica.	No se detectaron beneficios que se pierdan.
Compra de ortofotos para actualizar la nueva base de datos.	Reducción en costos de cosecha.	Actualización vuelo fotogramétrico para evaluación de compra de predios.	
Actualización de base de datos gráfica.	Reducción en costos de establecimiento.	Actualización de información de caminos.	
		Compra de datos LiDAR para proyectos específicos.	

RESULTADOS

Precisión Altimétrica

La tabla 2 presenta los intervalos de error absoluto de precisión altimétrica de los sistemas LiDAR, base SRTM de 30 m $\times$ 30 m y método PFG, respecto a la medida de referencia (ETBG). La mayor precisión, con 100% de los puntos bajo un error de 5 m, fue de LiDAR; además, en el caso de LiDAR, 92% de los puntos en los tres transectos presentó un error menor a un metro.

Para los sistemas alternativos, base SRTM y método PFG, se observó menor precisión; así 56% y 53% del error altimétrico se mantuvo en el intervalo de 0 m a 5 m, respectivamente. Además, el sistema SRTM presentó 2% de los puntos en el nivel de mayor error (15 m - 20 m), en cambio el método PFG no presentó errores en dicho intervalo; sino que los concentró en altitudes menores a 10 m (96%).

La prueba *t* de medias no generó diferencias significativas entre la información de la estación total y LiDAR, y entre la estación total y el método PFG ($P > 0,05$). Por el contrario, la prueba *t* sí fue significativa cuando se compararon los datos de la estación total con el sistema SRTM ($P < 0,05$). En relación con la prueba *F* para varianzas, no hubo diferencias significativas entre la

varianza de los datos generados por la estación total y LiDAR ($P > 0,05$). Por el contrario, las varianzas entre los datos de la estación total, el método PFG y el sistema SRTM fueron significativas ($P < 0,05$).

Los estadísticos RMSE y DIFA, que evalúan las diferencias entre el sistema de referencia (estación total) y los métodos LiDAR, base SRTM y método PFG, se presentan en la tabla 3. El menor RMSE y la menor DIFA se generó con la aplicación del método LIDAR, los mayores valores están dados por el sistema SRTM.

Precisión planimétrica

La prueba *t* de medias no generó diferencias significativas ($P > 0,05$) entre la información planimétrica de referencia (GPS) y los datos generados por LiDAR. Lo mismo ocurrió al comparar los datos de GPS con el método fotogramétrico. La misma tendencia se observó con la prueba *F* de varianzas; vale decir que no hubo diferencias significativas entre la varianza de los datos generados por el GPS y LiDAR, y GPS y método fotogramétrico ($P > 0,05$).

Además, los valores del RMSE y la DIFA fueron muy similares entre los métodos LiDAR y método fotogramétrico, lo cual apoya las tendencias obtenidas en los tests de Student (*t*) y de Fisher (*F*) (Tabla 4).

TABLA 2. Error en precisión altimétrica de los métodos LiDAR, SRTM (30 m $\times$ 30 m) y PFG.

	<i>Intervalo error</i> (m)	<i>T1</i> (81 puntos)	<i>T2</i> (89 puntos)	<i>T3</i> (85 puntos)	<i>Total</i> (255 puntos)
LIDAR	0-5	100	100	100	100
	0-5	43	48	76	56
Base SRTM	5-10	38	36	24	33
	10-15	14	15	0	9
	15-20	5	1	0	2
	0-5	62	53	44	53
Método PFG	5-10	33	44	52	43
	10-15	5	3	4	4
	15-20	0	0	0	0



TABLA 3. Raíz del error medio cuadrático (RMSE) y la diferencia agregada (DIFA) para el análisis altimétrico

Estadísticos	LiDAR	SRTM	Método PFG
RMSE	0,708	18,012	2,986
DIFA	0,501	324,428	8,917

TABLA 4. Raíz del error medio cuadrático (RMSE) y la diferencia agregada (DIFA) para el análisis planimétrico.

<i>Estadísticos</i>	<i>LiDAR</i>	<i>Método fotogramétrico</i>
RMSE	47,496	49,237
DIFA	2255,881	2424,300

Así, en el caso del análisis planimétrico, no hubo diferencias significativas entre LiDAR y el método alternativo, basado en rectificación de fotografías aéreas.

Análisis Beneficio/Costo

La evaluación económica entregó resultados rentables, con un VAN_{10%} de USD 2 095 000 y un valor anual equivalente de USD 309 960 año⁻¹, para un flujo de 10 años. Los costos se concentran en los cuatro primeros años del proyecto, a partir de ese momento se generan beneficios que fluctúan entre USD 650 000 y USD 690 000 por año. Por ello, se concluye que la decisión de moverse de un sistema basado en técnicas fotogramétricas y topográficas a un sistema LiDAR es económicamente ventajoso.

DISCUSIÓN

LiDAR es una tecnología que proporciona muchas ventajas operativas y económicas en la captura de datos de terreno, y que se destaca por otras disciplinas como la topografía o la fotogrametría (Ojeda, Vallejo, Hernández y Álvarez, 2007; Tomé *et al.*, 2013; Valencia *et al.*, 2014). No obstante, como lo indica Dassot *et al.*, (2011), LiDAR ya alcanzó madurez en su desarrollo a nivel de hardware, aunque continúa siendo muy costoso, y además ahora se requieren mejores herramientas de software para aprovechar todo su potencial en captura de datos. Aunque varios estudios

mencionan las ventajas de usar sistemas láser aerotransportados en manejo silvícola, también señalan limitantes, como el costo de los datos, y la necesidad de herramientas estandarizadas para procesar los datos, ya que la magnitud de datos en bruto no es útil en sí misma, y aún existe un reducido número de algoritmos, comercialmente disponibles, para su procesamiento (Wulder, 2003). En el mismo sentido, Beland *et al.*, (2019) indican que la superioridad de LiDAR para uso forestal está en la velocidad, la cobertura y la capacidad para describir atributos 3D en comparación con métodos alternativos.

CONCLUSIONES

La aplicación que se documenta en este estudio indicó que el método LiDAR presentó ventajas significativas, en precisión altimétrica, respecto a los métodos de comparación (Base SRTM y método PFG). Este aumento en precisión fue luego valorado en términos de sus efectos en la reducción de costos en faenas de caminos, cosecha y establecimiento de plantaciones. Este estudio de costos y beneficios, a partir del enfoque de Del Sol (1999) permitió evaluar la factibilidad económica de implementar el sistema LiDAR en una empresa forestal. Sin embargo, queda por evaluar el aumento potencial en valor que LiDAR podría proveer a la empresa, considerando las mejoras en software de procesamiento planteadas por Dassot *et al.* (2011).

REFERENCIAS

- Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., & Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, 119(3–4), 162–171.
- Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A., & Strahler, A. (2019). On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. *Forest Ecology and Management*, Volume 450, 117484, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117484
- Challis, K., Kokalj, Z., Kinsey, M., Moscrop, D., & Howard, A. J. (2008). Airborne lidar and historic environment records. *Antiquity*, 82(318), 1055–1064.
- Dassot, M., Constant, T., & Fournier, M. (2011). The use of terrestrial LIDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68(5), 959–974.
- Del Sol, P. (1999). Evaluación de decisiones estratégicas. Ciudad, país. McGraw-Hill Interamericana. 161 p.
- Falkowski, M. J., Smith, A. M. S., Hudak, A. T., Gessler, P. E., Vierling, L. A., & Crookston, N. L. (2006). Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32, 153–161.
- González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., & Miranda, D. (2012). Estimation of stand variables in *Pinus radiata* D. Don plantations using different LIDAR pulse densities. *Forestry*, 85, 281–292.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263.
- Lorenzo, A., Iseburg, M., Arbelo, M., & Alonso-Benito, A. (2012). Comparación de modelos digitales del terreno obtenidos mediante LIDAR y técnicas fotogramétricas en una zona forestal de la isla de Tenerife. In XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, 19–21 de septiembre de 2012, Madrid, España. Actas p. 34–41.
- Medina, A. A. (2011). *Estimación de altura de árboles en plantaciones de Pinus radiata D. Don. mediante procesamiento de datos LIDAR*. Tesis de maestría. Universidad de Talca. Talca, Chile.
- Ojeda, J., Vallejo, I., Hernández, L., & Álvarez, J. (2007). Fotogrametría digital y LIDAR como fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 44, 215–233.
- Ortiz-Reyes, A. D., Valdez-Lazalde, J. R., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Paz-Pellat, F., & Martínez-Trinidad, T. (2015). Inventario y cartografía de variables del bosque con datos derivados de LIDAR: comparación de métodos. *Madera y Bosques*, 21(3), 111–128. doi: 10.21829/myb.2015.213461
- Renslow, M., Greenfield, P., & Guay, T. (2000). Evaluation of multi-return LIDAR for forestry applications. San Dimas, California, USA. US Department of Agriculture Forest Service–Engineering, Remote Sensing Applications Center.
- Sala, H., Matko, C., Falk, U., & Grings, F. (2014). Análisis y comparación de dos modelos digitales de elevación en la isla 25 de Mayo (King George Island), Islas Shetland del Sur, Antártida. *Geoacta*, 39(2), 14–29.
- Sifuentes, F., & Vázquez, R. (1997). Introducción a la fotogrametría. México, D.F.: Editorial Trillas S.A. de C.V.
- Tomé, J. L., Sanjuanbenito, P., & Fernández, A. (2013). Cartografía de vegetación en la comunidad de Madrid utilizando información LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). En VI Congreso Forestal Español, 10–14 de junio de 2013, Vitoria-Gasteiz, España. Actas p. 1–14.
- Valencia, D., Hernández, J., Fassnacht, F., Cortés, L., Javier, L., & Corvalán, P. (2014). Estimation of aerial biomass using discrete-wave LIDAR data in combination with different vegetation indices in plantations of *Pinus radiata* (D. DON), Región del Maule, Chile. *SAFER Sustainability Agri Food Environmental Research*, 2(3), 30–49. doi: 10.7770/safer-V2N3-art823
- Wulder, M. A. (2003). *The current status of laser scanning of forests in Canada and Australia. Scandlaser Workshop* (Working paper 112 2003) Umea, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Resource Management and Geomatics.

Manuscrito recibido el 16 de mayo de 2020

Aceptado el 16 de septiembre de 2021

Publicado el 13 de diciembre de 2021

Este documento se debe citar como:

Alzamora, R. M., Becker, J. C., Escudero, M., & Pinto Rodríguez, A. A. (2021). Factibilidad técnico-económica de implementar LIDAR en una empresa forestal. *Madera y Bosques*, 27(2), e2721661. doi: 10.21829/myb.2021.2721661



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.