

APLICACIÓN DE DATOS LiDAR EN LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN FORESTAL EN EL PARQUE METROPOLITANO BOSQUE SAN CARLOS

APPLICATION LiDAR DATA IN ESTIMATING FOREST VOLUME IN THE METROPOLITAN PARK SAN CARLOS

Cristian Danilo Martínez Tobón
Ingeniero Catastral y Geodesta, Ingetec S.A.
ingcrisma@gmail.com

Jhon Eric Aunta Duarte
Ingeniero Catastral y Geodesta, Dirección General Marítima,
Subdirección de Desarrollo Marítimo.
eric.aunta@gmail.com

Jorge Alberto Valero Fandiño
Ingeniero Civil, M.Sc en Hidrosistemas, Profesor de Planta Facultad de Medio Ambiente,
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jvalero.ud@hotmail.com

Fecha de recepción: 14 de septiembre de 2012

Fecha de aprobación: 14 de mayo de 2013

RESUMEN

La tecnología LiDAR es una de las fuentes de información geográfica que permite obtener puntos de coordenadas incluyendo la altura con mayor precisión. Una de las principales aplicaciones que tiene LiDAR es en el sector forestal, pero que en Colombia el poco desarrollo de este sector limita explorar la conveniencia del uso de datos LiDAR para estimar recursos forestales. El presente trabajo explora el uso de datos LiDAR para la estimación del Volumen Forestal en el Parque Metropolitano Bosque San Carlos en Bogotá D.C. Se establece un marco de antecedentes con estudios similares, se analiza un grupo de herramientas informáticas para el manejo de los datos LiDAR y posteriormente, se establece un

procedimiento metodológico para obtener un modelo de regresión que relacione los datos de altura normalizados, con la variable de campo de Volumen Forestal. Se realizan análisis de regresión apoyado en criterios de decisión estadísticos probando varios modelos para seleccionar las variables que mejor representen el fenómeno, se establece la prueba de bondad de ajuste tanto del modelo como de sus parámetros. Aunque el modelo que se obtiene no arroja los resultados esperados en términos de la estimación del Volumen Forestal se analizan las causas de que eso ocurra. Finalmente, se valida el modelo aplicándolo para la totalidad de la zona de estudio y se representa geográficamente a través de un mapa temático.

Palabras clave: Volumen Forestal, LiDAR, Análisis de Regresión, FUSION/LDV, MDV.

ABSTRACT

LiDAR technology is a source of geographic information for obtaining coordinate points including height, with more accurately, one of the main applications is having LiDAR in forestry, but in Colombia the underdevelopment of this sector limits explore the convenience of using LiDAR data to estimate forest resources. This paper explores the use of LiDAR data for estimating forest volume in Metropolitan Park Forest San Carlos in Bogota DC Establishing a framework for background with similar studies; analyze a group of tools to manage LiDAR data and subsequently establishing a methodological procedure for a regression model relating the standard height data, with variable field, forest volume. Regression analysis was performed on decision criteria supported statistical testing various models to select the variables that best represent the phenomenon, establishing the goodness of fit test of the model and its parameters. Although the model is obtained did not produce the expected results in terms of estimating forest volume examines the causes of that happening. Finally the model is validated by applying it to the entire study area and represented geographically through a thematic map.

Keywords: Volume Forestry, LiDAR, Regression Analysis, FUSION / LDV, DVM.

INTRODUCCIÓN

El avance de la tecnología LiDAR como fuente de información geográfica, permite obtener datos con un nivel de detalle que con otras tecnologías de captura de información no ha sido posible, lo cual ha dado como resultado que en diversos países pioneros en el manejo de esta tecnología como España, Holanda, Noruega, Estados Unidos, entre otros, la utilicen bastante en el campo forestal, específicamente en los inventarios forestales y la obtención de diversas variables dasométricas como el Volumen Forestal, densidad, área basimétrica, biomasa, entre otras; obteniendo unos resultados satisfactorios en la rapidez de adquisición de los datos, el nivel de detalle y la precisión planimetría y altimétrica.

Colombia es un país con gran riqueza boscosa y arbórea, sin embargo, la industria forestal y la preservación de los bosques son temáticas muy poco desarrolladas. Las pocas entidades que realizan estudios y actividades de tipo forestal especialmente, las realizadas para determinar recursos en términos de variables forestales como volumen, biomasa, densidad, aún se realizan con las técnicas tradicionales.

Las aplicaciones que se han desarrollado en Colombia a través de la utilización de datos LiDAR han sido orientadas a temas de topografía y obtención de Modelos Digitales de Terreno de precisión.

Con la intención de dar a conocer la aplicación de los datos LiDAR en el sector forestal, se desarrolla un trabajo exploratorio en donde se ilustra la conveniencia del uso de

este tipo de tecnologías para la gestión y manejo de los recursos forestales.

Es así, como a través del análisis de los diversos métodos y técnicas que han sido desarrolladas por distintos autores, que han generado trabajos donde estiman variables forestales a partir de los datos LiDAR, se elige y aplica una metodología para obtener un modelo matemático que permita la estimación y predicción del Volumen Forestal en el área de estudio seleccionada.

Generalmente, la caracterización o cálculo de recursos forestales requiere de un inventario en campo para medir alguna variable forestal (volumen, biomasa, densidad, etc.) y dependiendo del área de estudio pueden existir diversos factores que hagan de ese inventario un trabajo de campo bastante dispendioso.

Una de las variables más importantes en los inventarios forestales es el Volumen Forestal; es un dato que representa recursos en términos de cantidad maderable- aprovechable de los individuos arbóreos y que en el sector comercial de las maderas, en países donde existen grandes extensiones de bosques plantados con fines comerciales, es de vital importancia.

Por lo anterior, la estimación del Volumen Forestal a partir de datos LiDAR permite mostrar el panorama de oportunidades a diversos sectores estatal, comercial, de aplicar tecnologías de este tipo para beneficio y desarrollo del sector.

Dado que en Colombia la tecnología LiDAR apenas está siendo utilizada y por ende el

acceso a la información de ese tipo es limitada, desde el punto de vista de la consecución de los datos y, que además el sector forestal está muy poco desarrollado y es poco conocido, el estudio se aplica en una zona muy pequeña comparada con las zonas de estudio de otros autores, el área de estudio corresponde al Parque Metropolitano Bosque San Carlos de la ciudad de Bogotá D.C y un sector aledaño al mismo.

El objetivo principal es el desarrollo de una metodología que permita estimar el Volumen Forestal para el área de estudio, desde la información que otorgan los datos LiDAR, incluyendo un análisis de las principales técnicas que han desarrollado otros autores para objetivos similares, análisis para el procesamiento y manejo de los datos LiDAR, la selección y propuesta metodológica para encontrar la relación entre el Volumen Forestal y la información de datos LiDAR y, finalmente, la estimación del Volumen Forestal para la totalidad de la zona de estudio, acompañada de la representación a través de un mapa temático que ilustre las cantidades calculadas.

1. ANTECEDENTES

LiDAR es un sensor láser aerotransportado, que permite obtener puntos georreferenciados de todos los elementos sobre la superficie terrestre. El principio de funcionamiento es el cálculo del tiempo que toma una señal láser en ir y regresar, la cual es enviada a la superficie y, la posición de cada uno de los puntos es ajustada en el espacio gracias a los Sistemas de Posicionamiento Global por

Satélite, GNSS, que se acoplan al sensor en el avión y estaciones de control en tierra.

Sin lugar a duda, una de las aplicaciones más desarrolladas con el uso de datos LiDAR se ha dado en el campo forestal; en países donde la preservación de bosques y su explotación comercial tienen importancia, se han desarrollado trabajos cuyo objetivo ha sido encontrar alguna relación de la nube de puntos con coordenadas tridimensionales que otorga LiDAR y alguna variable forestal.

Los estudios que se han desarrollado han tomado dos enfoques para la estimación de variables forestales, el primer enfoque está orientado a la identificación de individuos individuales para posteriormente, calcular algún tipo de variable dasométrica. El segundo enfoque está orientado a la caracterización de pequeñas zonas para posteriormente, extrapolar esa caracterización a una región mucho mayor en términos de área.

En el Parque Nacional Forestal Bávaro, se llevó a cabo la estimación del volumen del tallo, el Diámetro a la Altura de Pecho – DAP, mediante análisis de regresión con los datos completos de las formas de las señales LiDAR basados en la técnica de cortes de segmentación normalizada. La metodología consistió en descomponer la forma de la señal y obtener el ancho y la intensidad de cada pulso de la señal. Posteriormente, se realizó una segmentación de árboles individuales aplicando la técnica de cortes de segmentación normalizada sobre una estructura voxel. Se clasifican las especies para árboles de coníferas y de hoja caduca y se realiza la estimación de las variables en

cuestión. Los resultados obtenidos muestran que el volumen del tronco de los árboles de coníferas se puede estimar con mayor precisión que el volumen de troncos de árboles de hoja caduca, obteniendo un R2 de 0,91 con Raíz del Error Cuadrático de la Media (RMSE) de 0,43 m³ y un R2 de 0,79 con RMSE de 0,50 m³, respectivamente [1].

Popescu en su trabajo sobre la medición individual de variables forestales encontró que, para especies de pinos cuya morfología presenta una mejor definición, la estimación de variables como la biomasa tuvo un R2 de 0.82 con un RMSE de 29 Mg/ha, en el caso del Volumen Forestal se obtuvo un R2 de 0.83 con un error de 47,9 m³/ha; mientras en especies de árboles caducifolios los resultados para la biomasa fueron de un coeficiente de determinación R2 de 0.32 con un RMSE de 44 Mg/ha y, en el caso del Volumen Forestal el R2 fue de 0.39 con un RMSE de 52.84 m³/ha [2].

En un estudio realizado en Korea sobre la estimación del volumen y la biomasa en el cual identifican primero el individuo, concluyen que en los intentos de estimar el volumen y la biomasa en individuos de pino coreano se obtiene en el mejor de los casos un 68% de calidad de la estimación para el volumen y de un 48% en la estimación de la biomasa, aduciendo que los resultados no tan buenos se debieron a la dificultad de identificación de árboles individuales especialmente, en zonas de alta (1340 árboles/ha) y media (370 árboles /ha) densidad [3].

En trabajos más generalizados, se realiza un estudio en España, cuyo objetivo es ob-

tener modelos que permitan estimar, a partir de datos LiDAR, variables dasométricas de interés para la gestión forestal, en pinares de *Pinus Nigra* Arnold de la Comarca de la Serranía Alta de Cuenca. Estas variables son: Volumen (m³/ha), biomasa total aérea (kg/ha), área basimétrica (m²/ha) y densidad (pies/ha). Dentro de los resultados se obtienen modelos de regresión con una alta precisión en la estimación de las variables, exceptuando la estimación de la densidad; para el volumen se obtuvo un R² de 0,899, el área basimétrica un R² de 0,880 y para el número de pies por hectárea 0,527 [4].

Otros autores dan a conocer la ventaja e idoneidad del uso de los datos LiDAR para los inventarios forestales y estimar parámetros forestales, justifican sus conclusiones desde la comparación de los inventarios forestales tradicionales con los inventarios apoyados

en datos LiDAR; concluyen que la principal ventaja es la disminución del error y mejor ajuste de los modelos de regresión [5].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la metodología empleada para la obtención del resultado final, en conjunto con el objetivo de dar a conocer las ventajas del uso de los datos LiDAR, se consultó y aplicó un análisis de las herramientas informáticas que pudieran facilitar el desarrollo del mismo.

Posterior al análisis de las mejores herramientas informáticas se elige uno de los métodos aplicados por los diversos autores de estudios con temáticas similares, el análisis de regresión para relacionar los datos LiDAR con la variable en estudio.

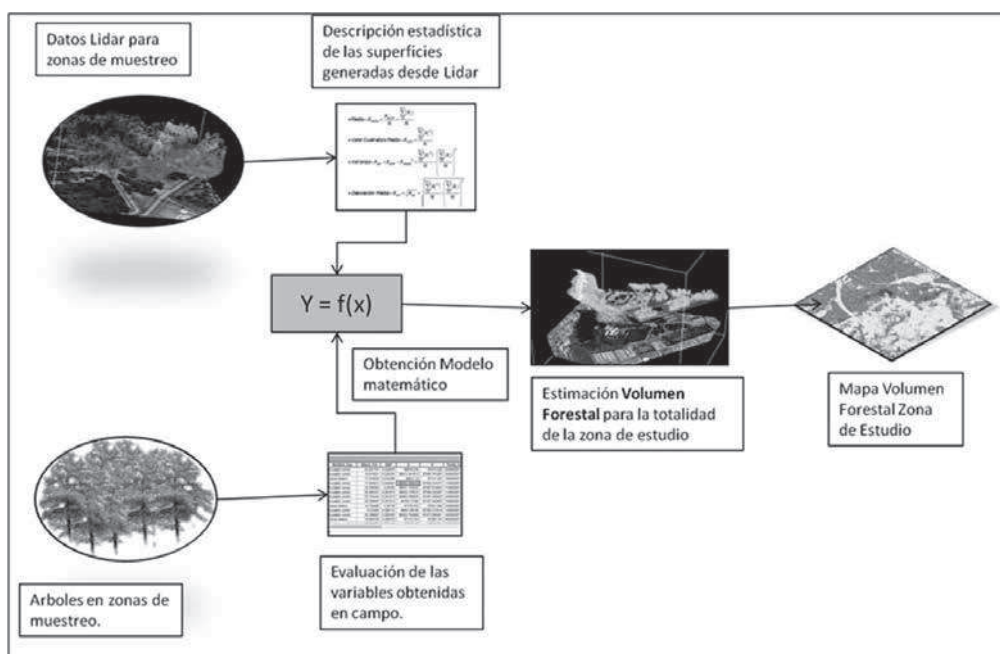


Figura 1. Metodología Estimación del Volumen Forestal. Fuente: Los autores.

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se sitúa en la ciudad de Bogotá D.C, en el Parque Metropolitano Bosque de San Carlos, que se encuentra ubicado en la localidad de Rafael Uribe, entre las carreras 13 y 13A y entre las calles

27 A y 34 Bis sur. Se destaca la gran diversidad de especies arbóreas presentes en el área de estudio (más de 70 tipos de especies), siendo relevantes el Eucalipto común, Ciprés Italiano, Acacia Japonesa, Guayacán de Manizales y Caucho Sabanero.

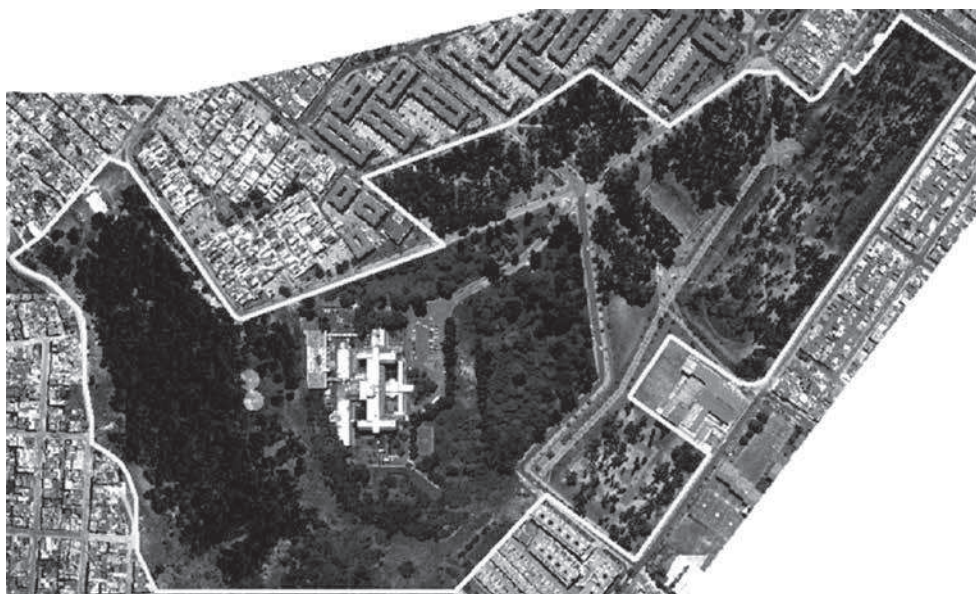


Figura 2. Localización del área de estudio. *Fuente:* Los autores.

2.2 DATOS DE CAMPO

Los datos del inventario del arbolado fueron capturados por el Jardín Botánico, José Celestino Mutis en el año 2008. La información fue suministrada en formato Shapefile (.shp), y contiene un total de 8027 puntos, de los cuales cada registro representa un árbol individual. Adicionalmente, cada registro contiene más de 60 atributos que identifican cada árbol. Dentro de estas características se encuentra información asociada con el código del árbol, nombre científico, nombre común, altura total, diámetro a la altura de pecho, fisiología, tipo de árbol,

forma del tronco, altura del fuste, altura de la copa, entre otras características. La información del inventario al ser cruzada con el área de estudio y depurarla al encontrar registros que no tenían la información completa, se obtuvo un total de 2821 puntos conservando las características de los datos originales descritos anteriormente.

2.3 DATOS LiDAR

La nube de puntos LiDAR fue capturada en el año 2006 por la firma Merrick & Company, utilizando el sensor ALS40 con una tasa de repetición láser de 100 Hz a 58 KHz, ángu-

lo de campo de vista entre 5 y 75° y ancho de barrido y frecuencia de escaneo variable. La nube de puntos fue suministrada en dos planchas en formato Log ASCII Standard (.LAS), con un espaciado promedio de 1,73 puntos/m² y discriminados en dos clases; la clase 1 sin clasificar y la clase 2 el terreno, esto de acuerdo al estándar implementado por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS.

2.4 PROCESAMIENTO DATOS LiDAR

Inicialmente, se realiza un análisis del software disponible para procesar los datos LiDAR. Las herramientas analizadas fueron: ArcGIS de la Environmental Systems Research Institute – ESRI, MARS Software propietario de la firma Merrick & Company, FUSION desarrollado por el Servicio Forestal y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y finalmente, el Software Fugro Viewer.

El Software escogido para procesar los datos LiDAR fue FUSION/LDV al ser la herramienta más completa para el tratamiento de los datos, al permitir no solo visualizarlos, sino también ofrecer un nivel de procesamiento de los mismos aceptable para el

desarrollo del trabajo, además de no tener un costo asociado por tratarse de una herramienta de libre uso.

Aunque los datos ya presentaban una clasificación para la clase de terreno, se eligió utilizar el algoritmo de generación de MDT que incluye FUSION/LDV y permite controlar los resultados obtenidos para la superficie. El algoritmo permite primero filtrar sólo los puntos de terreno a partir de una función que se ejecuta para cada punto de los datos LiDAR de manera iterativa, permitiendo al usuario controlar qué puntos ingresaran a formar parte del MDT. Posteriormente, se aplica otro algoritmo de FUSION que selecciona sólo los puntos con mayor altura en un área determinada por el usuario en este caso 1 m² y así, obtener el modelo digital de superficies – MDS.

Cuando se tiene el MDT se normalizan las alturas de la nube de puntos, de tal forma, que los valores de altura están referidos al terreno local y no a la superficie de referencia que tenían los datos (en este caso alturas elipsoidales). Las alturas referidas al MDV, es decir la diferencia de alturas entre el MDT y el MDS, es identificada como el Modelo Digital de Vegetación – MDV.

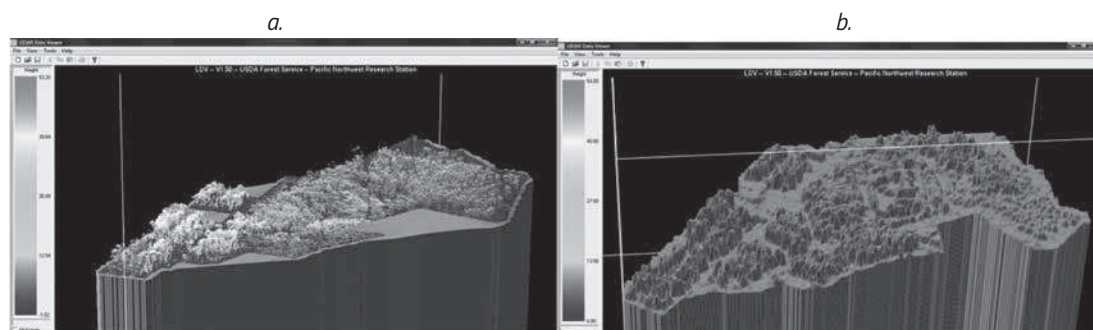


Figura 3. *a.* Modelo Digital de Terreno – DTM; *b.* Modelo Digital de Vegetación – DVM. *Fuente:* Los autores.

2.5 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE CAMPO

Se verificó en campo el inventario del arbolado suministrado por el Jardín Botánico y su posicionamiento con respecto al servicio WMS de la ortofoto del año 2007 proporcionado en la página web de la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital – IDECA, con el fin de seleccionar las áreas de muestra para la construcción del modelo. La selección de las áreas de muestra se obtuvo de analizar la media de la distancia entre individuos arbóreos y dio como resultado que la unidad de estudio debían ser celdas cuadradas de 10 metros de lado. Se elaboró una grilla con celdas de 10 metros de lado sobre la totalidad del área de estudio.

La selección de las celdas de muestra se realizó bajo un criterio de distribución espacial ocupando toda el área de estudio. El resultado es un total de 120 celdas cuadradas de tamaño 10 metros x 10 metros. El Volumen Forestal para cada celda de muestreo se obtuvo como la suma de los volúmenes forestales para cada individuo arbóreo dentro de la celda.

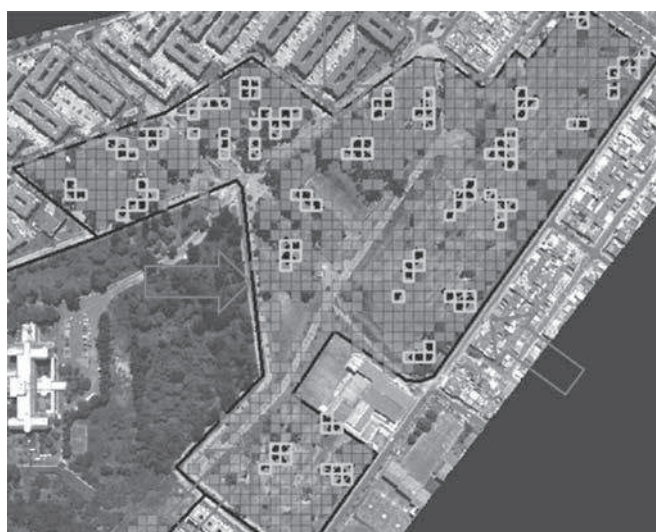


Figura 4. Distribución de las áreas de muestreo. Fuente: Los autores.

2.6 OBTENCIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN

Las variables involucradas en la especificación del modelo de regresión son el Volumen Forestal, que es la variable dependiente calculada por el Jardín Botánico de la siguiente manera:

$$\text{Volumen forestal árbol} = Af \times \text{Área basal} \times ff \quad (1)$$

Donde, Af es la altura del fuste, *área basal* que se calcula a través del DAP, diámetro a la altura del pecho y su relación con la fórmula del área de la circunferencia y ff es el

factor forma (0,7 para el eucalipto común que es la especie predominante, 42% de las especies en el área de estudio).

Las variables independientes se obtienen desde las herramientas de procesamiento y tratamiento del Software FUSION/LDV, en el cual se define las mismas áreas o unidades de muestreo que se usaron para la variable dependiente y se calcula una serie de medidas estadísticas de cada una de las áreas de muestreo, es decir, se resume el MDV (Modelo Digital de Vegetación) estadísticamente.

Las estadísticas en las que se resume el MDV son obtenidas usando el comando *Cloudmetrics* de FUSION/LDV [6].

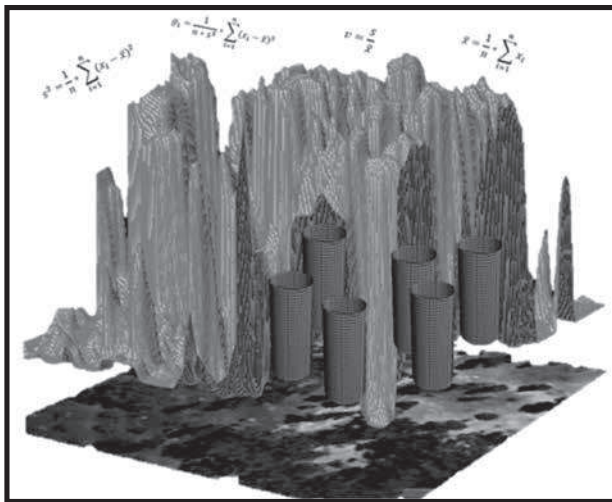


Figura 5. Fenómeno a estimar (Volumen Forestal en función de las estadísticas de los LiDAR).
Fuente: Los autores.

Para la obtención de un modelo de regresión se analiza la naturaleza del fenómeno y se justifica apoyándose en criterios estadísticos, obteniendo como resultado las variables más opcionadas a representar el Volumen Forestal en términos de las alturas obtenidas de los datos LiDAR.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez fue calculado el Volumen Forestal para las 120 celdas de muestreo en términos de m³ por áreas de 100 m², y el MDV resumido estadísticamente para las mismas celdas, se obtuvo una variable dependiente y 36 variables independientes obtenidas de la información de altura de los datos LiDAR.

Al realizar un análisis del fenómeno se identifica que el Volumen Forestal es el volumen de un cuasi-cilindro, que se encuentra inmerso o bajo el volumen que genera un árbol al colocarle una sábana encima y cae hasta el suelo. Al generalizar este análisis a las áreas o celdas de muestreo se asimila que el Volumen Forestal de dichas celdas de muestreo, es la suma de todos los volúmenes de los individuos dentro de cada celda; y ese volumen está inmerso en el volumen que ocupan todos los árboles en esa celda al colocarles una sábana o cobija.

Son entonces esas 36 variables estadísticas un resumen de esa situación, es así que se plantea que una variable como la media, deberá tener bastante influencia en un futuro modelo ya que resumen esos picos y valles de las alturas (Aplana esa sábana que se imagina sobre los árboles), de la misma forma, al analizar las medidas de dispersión como la desviación estándar, se concluye que otorga una característica de la morfología de los árboles, si la media tiene un valor alto y la desviación estándar un valor pequeño puede indicar que en esa área de muestreo se está frente a una zona muy copada de ramas y hojas y además con árboles altos, ya que muy pocos puntos del sensor lograron llegar al suelo.

Se encontró además que existen variables que pueden dar información redundante como los percentiles y que incluir todos ellos en un modelo, puede ocasionar ruido en el modelo.

Para apoyar el análisis de la naturaleza del fenómeno se realiza entonces una matriz

de correlación de todas las variables incluyendo el Volumen Forestal. De allí se eligen las variables independientes que mayor correlación tienen con el Volumen Forestal y además tienen correlaciones bajas entre ellas mismas

Se parte entonces de un modelo inicial de regresión de la forma:

$$\begin{aligned} Vol_Forestal = & \beta_1 + \beta_2 Elevmean_i + \beta_3 Elevstddev_i \\ & + \beta_4 ElevCV_i + \beta_5 ElevKurtosis_i \\ & + \beta_6 Elevskewness_i + u_i \end{aligned} \quad (2)$$

Para afinar el modelo se realiza un proceso de selección de variables paso a paso (Stepwise), con el fin de incorporar solo las variables más significativas en el modelo.

Al modelo obtenido se aplica una prueba de bondad de ajuste tanto en el modelo como en sus parámetros y se analizan los supuestos de normalidad, autocorrelación y heterocedasticidad.

Al realizar el proceso de selección de variables con el método Stepwise se obtuvo un modelo de estimación del Volumen Forestal, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Vol_Forestal = & -5,7484618 \\ & + 0,68548776 Elevmean \\ & + 3,38415621 Elevskewness \end{aligned} \quad (3)$$

El valor del coeficiente de determinación R^2 fue de 0,43, con un error medio cuadrático de $3,51 m^3$ en un área de $100 m^2$ (Figura 6).

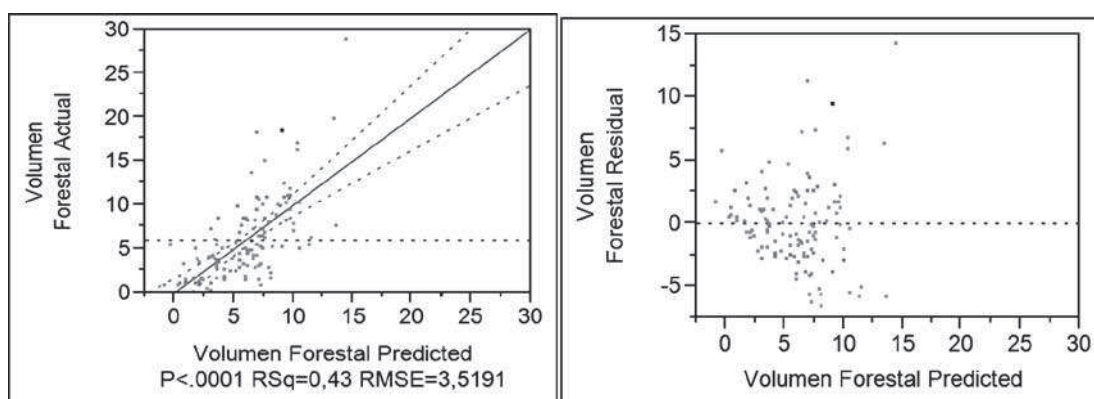


Figura 6. Modelo de predicción y residuales. Fuente: Los autores.

La figura anterior deja al descubierto que la varianza del error no es constante. Se realizó entonces una prueba de normalidad Jarque Bera en los residuos, el test de heterocedasticidad de White y la prueba de Durbin Watson y, se comprobó que no existe normalidad en los residuos, hay presencia de autocorrelación y heterocedasticidad.

Para corregir estos problemas se realizó una transformación al modelo especificado en (3), al observar el comportamiento de los residuos que crecen al aumentar el Volumen Forestal y el volumen frente a las variables independientes indicó un comportamiento exponencial, así que se aplicó una transformación logarítmica y se obtuvo el siguiente modelo:

$$\ln(Vol_Forestal) = \beta_1 + \beta_2 Elevmean_i + \beta_3 Elevskewness_i + u_i \quad (4)$$

De nuevo, se analizaron los supuestos de normalidad, autocorrelación y heterocedasticidad y se obtuvieron los siguientes resultados:

Normalidad: Al realizar la prueba Jarque Bera se obtuvo:

Tabla 1. Prueba de Normalidad Jarque Bera.

n	120
kurtosis	1,893537
Asimetría	-0,778674
JB	18,24796582

Fuente: Los autores.

Como el valor de JB no está cercano a cero, entonces se comprueba que no existe normalidad en los residuos.

Homocedasticidad: Al realizar el test de White se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 2. Test de Heterocedasticidad de White.

R ²	0,04825938
N	120
Ji cuadrada calculada	5,7911257
Ji cuadrada tabla (95% confiabilidad)	1,145476
grados libertad	5

Fuente: Los autores.

En la Tabla 2 se observa que el valor de Ji cuadrada calculada es de 5,79, y la Ji cua-

drada de tabla para 5 grados de libertad con un 95% de confiabilidad es de 1,14. Como el valor de Ji cuadrada calculada es mayor que la Ji cuadrada de tabla, la conclusión es que hay heterocedasticidad.

Autocorrelación: Al realizar la prueba de Durbin Watson se obtienen los siguientes resultados:

Para k= 2 y n=120 con un porcentaje de confiabilidad del 95% dL=1.706 y du=1.760,

Tabla 3. Test d de Durbin Watson.

Durbin - Watson	Número de observaciones	Autocorrelación	Prob<DW
1,7654364	120	0,1138	0,0902

Fuente: Los autores.

Se obtuvo un valor d de Durbin Watson de 1,76, lo que significa que no hay autocorrelación.

Los resultados obtenidos después de transformar la variable dependiente, en este caso el Volumen Forestal, nos indican que ya no existe autocorrelación en los residuos aunque todavía existe heterocedasticidad y falta de normalidad.

Si se analiza esta situación se debe tener en cuenta que existe diversidad de especies arbóreas en el parque, que se asumió una fórmula para el cálculo del Volumen Forestal basados en que el 41% de los árboles son eucaliptos, que no existe un patrón de distribución de una especie respecto a otra, es decir mezcla de especies en toda el área de estudio, lo cual genera un problema de

observación y afecta la normalidad de los datos la cual se presume.

Lo anterior, conlleva a que el comportamiento del Volumen Forestal y su relación con la altura media y la asimetría sea diferente dependiendo el tipo de especie presente, es decir, los árboles con altura baja pueden presentar un Volumen Forestal muy dispar debido a la morfología de cada tipo de especie, por otro lado, árboles de gran altura pueden presentar volúmenes forestales altos y variables, dependiendo del tipo de especie y la densidad de los árboles. Este análisis conlleva a que la varianza del error no es constante en la muestra ya que la diversidad de especies arbóreas hace que el Volumen Forestal sea muy dispar.

Sin embargo, se decide utilizar el modelo de regresión de esta forma para realizar la estimación del Volumen Forestal.

Finalmente, se realiza una transformación inversa del modelo de regresión para estimar directamente el Volumen Forestal ya que se encontraba en términos del logaritmo natural del volumen. Al realizar dicha transformación obtenemos el siguiente modelo de regresión definitivo sobre el que se hacen las estimaciones del Volumen Forestal:

$$\text{Volumen Forestal} = e^{(-0,53857 + 0,1122602 \cdot \text{Elevmean} + 0,3388678 \cdot \text{Elevskewness})} \quad (5)$$

Tabla 4. Resumen del modelo.

R cuadrado	0,449934
R cuadrado Ajustado	0,440532
Raíz del error medio cuadrático	0,654463
Media de la respuesta	1,467266
Observaciones	120

Fuente: Los autores.

Tabla 5. Análisis de varianza.

Fuente	DF	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Relación F
Modelo	2	40,991261	20,4956	47,8509
Error	117	50,113714	0,4283	Prob > F
C. Total	119	91,104975		<,0001*

Fuente: Los autores.

Tabla 6. Parámetros estimados.

Término	Estimado	Error estándar	Relación t	Prob> t
Intercepto	-0,538575	0,254659	-2,11	0,0366*
Elev mean	0,1122602	0,01559	7,20	<,0001*
Elev skewness	0,3388678	0,155206	2,18	0,0310*

Fuente: Los autores.

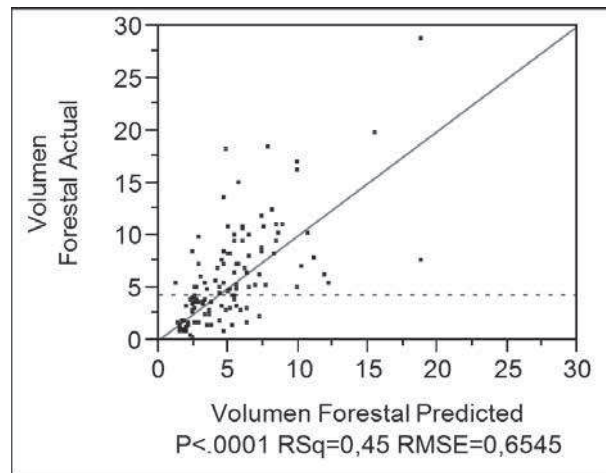


Figura 7. Volumen Forestal actual VS Volumen Forestal predicho. Fuente: Los autores.

En la Tabla 4 se observa que el valor de R^2 es de 0,4499, lo cual indica que la variación en el Volumen Forestal está explicado en un 44% por la variación conjunta en la elevación media y el coeficiente de asimetría. También se observa que la calidad del modelo

en términos del error medio cuadrático, en la estimación del volumen, es de $0,65m^3$ en un área de $100m^2$.

Posterior a la obtención del modelo se aplicó el mismo a la totalidad del área de estudio. De nuevo se usó el Software FUSION/LDV para obtener las estadísticas para cada celda de la totalidad del área de estudio. Una vez se calculó la estadística para cada celda del área de estudio se estimó el Vo-

lumen Forestal para cada una aplicando la ecuación (5).

Para la representación del Volumen Forestal estimado, se generó una tabla para vincularlos como un atributo en la capa que contiene cada celda, se generó además una máscara o plantilla para que en los lugares donde existen construcciones no se aplicara el valor calculado.

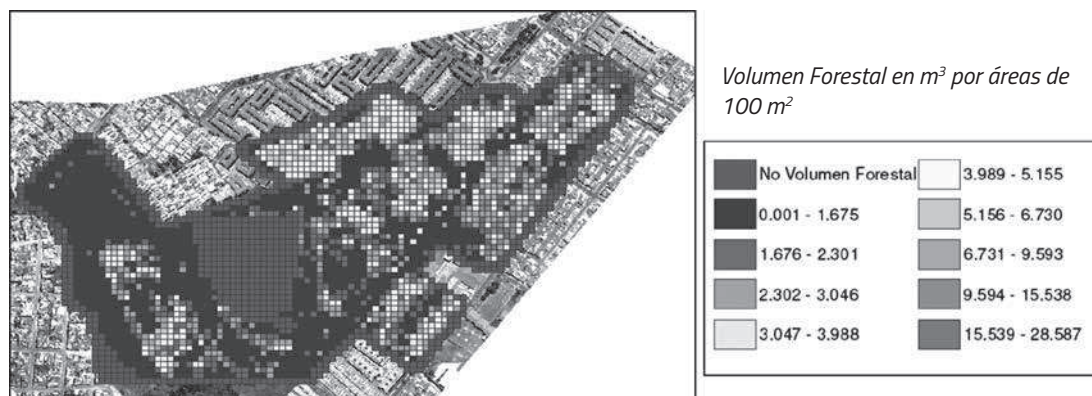


Figura 8. Volumen Forestal. Fuente: Los autores.

Obsérvese que para las zonas que corresponden a vías o áreas sin vegetación arbórea el volumen fue muy bajo, manteniendo la lógica del fenómeno; mientras que en las áreas que en la ortofotografía se mostraba presencia de árboles presentan rangos de valores más altos para la variable estimada, manteniendo de nuevo la lógica del análisis y representando la naturaleza del fenómeno estudiado.

4. CONCLUSIONES

En términos generales y teniendo en cuenta las dificultades y problemas encontrados

en el modelo, se puede concluir que un estudio que se lleve a cabo con esta tecnología y que pretenda estimar recursos forestales en zonas más homogéneas en términos de especies, va a tener muy buenos resultados en términos de precisión.

Por otra parte queda totalmente demostrado, al igual que en estudios realizados por otros autores mencionados en los antecedentes, que la estimación de variables forestales en especies arbóreas que no presentan una morfología representada por formas geométricas determinables fácilmente, presentan resultados regulares o modestos.

Si se es estricto, los resultados de este trabajo muestran que no es recomendable aplicar el modelo obtenido en áreas con gran diversidad arbórea, ya que la varianza de los errores no se mantiene constante a pesar de realizar una transformación al modelo, lo cual se ve reflejado en que las estimaciones realizadas pueden llegar a ser erróneas.

Se espera cumplir con la intención de mostrar a la comunidad nacional y local, incluyendo los sectores académicos, comerciales y estatales, las ventajas y riqueza de información que se obtiene con sensores LiDAR a través de la aplicación práctica en un campo en el que esta tecnología ha encontrado bastantes aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Merrick & Company, por su apoyo a través del permiso de uso de los datos LiDAR tomados por ellos en la ciudad de Bogotá D.C. en el año 2006. Al Jardín Botánico José Celestino Mutis, por su apoyo a través del permiso de uso de la información georreferenciada del censo arbolado urbano de Bogotá para el área de estudio y las asesorías prestadas para la definición de las variables que permiten calcular el Volumen Forestal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Yao Wei, Krzystek Peter, Heurich Marco. (2012), Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform Li-

DAR data, En: Remote Sensing of Environment, Volume 123, p. 368.

[2] Popescu S. C., Wynne R. H. y Nelson R. F. (2003), Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass, En: Canadian Journal of Remote Sensing, Volume 29 (5), p 564-577.

[3] Doo-Ahn Kwak, Woo-Kyun Lee, Hyun-Kook Cho, Seung-Ho Lee, Yowhan Son, Menas Kafatos, So-Ra Kim.,(2010) Estimating stem volume and biomass of Pinus koraiensis using LiDAR data. En: Journal of Plant Research Springer Japan, Volume 123, Issue 4, pp 421-432, ISSN 0918-9440.

[4] García García David. (2010), Estimación de variables de interés forestal basada en datos LiDAR en el monte número 117 del C.U.P. término municipal de Cuenca, 194 p. Trabajo de Grado (Ingeniería Técnica Forestal), Universidad Politécnica de Madrid.

[5] Martín Gil Alberto. (2010), Estructura forestal y trabajos selvícolas en el MUP de Sinarcas (Valencia) Comparación entre inventarios forestales tradicionales y mediante tecnología LiDAR, 104 p. Trabajo de Grado (Ingeniería Técnica Forestal) Universidad Politécnica de Valencia.

[6] Robert J. McGaughey, (2010) Manual FUSION/LDV Software for LiDAR Data Analysis and Visualization, U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

[7] H. Weinacker, B. Koch, U. Heyder, R. Weiancker, (2004). Development of filtering, segmentation and modeling modules for lidar and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. En: Proceedings of ISPRS Working Group on Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment Instruments, Processing Methods and Applications, Freiburg Germany, pp 50-55.

[8] J. Breidenbach, E. Naesset, V. Lien, T. Gobakken, S. Solberg, (2010). Prediction of spe-

- cies specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. En: Remote Sensing of Environment 114, pp 911-924.
- [9] M. García, E. Prado, D. Riaño, E. Chuvieco, F.M. Danson, (2009). Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo, En: Geofocus, Volumen 9, pp 184-208, ISSN 1578-5157.
- [10] Sorin C Popescu, Zhao Kaiguang, (2008). A voxel-based LiDAR method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. En: Remote Sensing of Environment 112, pp 767-787.
- [11] Sorin Popescu, Randolph Wynne, Ross Nelson, (2002). Estimating plot-level tree heights with LiDAR: local filtering with a canopy-height based variable window size. En: Computers and Electronics in Agriculture 37, pp 71-95.
- [12] J. Vauhkonen, I. Korpela, M. Maltamo, T. Tokola, (2010). Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity and alpha shape metrics. En: Remote Sensing of Environment 114, pp 1263-1276.
- [13] Y. Kim, Z. Yang, W.B. Cohen, D. Pflugmacher, C.L. Lauer, J.L. Vankat, (2009). Distinguishing between live and dead standing tree biomass on the North Rim of Grand Canyon National Park, USA using small-footprint LiDAR data. En: Remote Sensing 113, pp 193-203.

