

Geometría utilizada en nubes de puntos de alta densidad Geometry used in high-density point clouds

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

David Santiago Ruiz Bazurto

Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. dsruizb@udistrital.edu.co

Pedro José Jácome Ortiz

PhD. Educacion, Msc. Educación, Universidad Javeriana. Esp. Administración total de Calidad, Universidad del Valle Vicerrector Académico Instituto Técnico Simón Rodríguez -INTENALCO -Cali. vicerectoria@intenalco.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-5071-5894>

Nelson Enrique Barrios Jara

PhD. Educacion, Msc. Educación, Universidad Javeriana. Director Grupo de Investigación Foraved. Profesor, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Proyecto curricular de Tecnología en Saneamiento ambiental. nebarriosj@udistrital.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-0815-201X>

Resumen

Este artículo aborda la aplicación de la tecnología LiDAR en la generación de modelos digitales, explorando sus fundamentos, procesos y diversas aplicaciones. LiDAR, una técnica de teledetección óptica basada en pulsos láser, la cual se destaca por su versatilidad, desde la zonificación de riesgos naturales hasta la modelación urbana y la preservación del patrimonio arqueológico. Se examinan las fases de adquisición de datos, el procesamiento de nubes de puntos y los métodos de modelado de las nubes de puntos, incluyendo la triangulación y mallas poligonales, así como los tipos de modelos digitales que se manejan en el mercado. Este artículo ofrece una visión integral de LiDAR, destacando su papel esencial en la obtención y aplicación de datos tridimensionales para una variedad de disciplinas y sectores, además de dar un amplio contexto acerca de los procedimientos necesarios para realizar el modelado geométrico de una nube de puntos.

Palabras clave: *LiDAR, escáner láser, nube de puntos, filtrado, modelado, modelo digital de terreno – DTM, triangulación.*

Abstract

This article addresses the application of LiDAR technology in the generation of digital models, exploring its foundations, processes and various applications. LiDAR, an optical remote sensing technique based on laser pulses, which stands out for its versatility, from the zoning of natural hazards to urban modeling and the preservation of archaeological heritage. It examines the phases of data acquisition, point cloud processing, and point cloud modeling methods, including triangulation and polygon meshes, as well as the types of digital models that are handled in the market. This article provides a comprehensive overview of LiDAR, highlighting its essential role in obtaining and applying three-dimensional data for a variety of disciplines and sectors, as well as providing extensive context on the procedures required to perform geometric modeling of a point cloud. El mismo contenido del resumen en idioma inglés.

Key Words: *LiDAR, laser scanner, point cloud, filtering, modeling, digital terrain model – DTM, triangulation.*

1. Introducción

La revolución tecnológica ha catapultado la capacidad de capturar y analizar nuestro entorno en tres dimensiones, transformando radicalmente la manera en que entendemos y utilizamos la información geoespacial. En este contexto, la tecnología LiDAR emerge como un pilar fundamental en la generación de modelos digitales tridimensionales, ofreciendo una visión detallada y precisa de la topografía y estructuras de nuestro entorno. LiDAR, acrónimo de "Light Detection and Ranging", es una técnica de teledetección óptica que utiliza pulsos láser para obtener mediciones exactas de la superficie terrestre en coordenadas tridimensionales (x, y, z). Desde la zonificación de riesgos naturales hasta la planificación urbana y la preservación del patrimonio arqueológico, la versatilidad de LiDAR abarca diversos campos y aplicaciones.

De manera simplificada, el modelado geométrico con nubes de puntos LiDAR es un proceso que permite capturar datos tridimensionales del entorno, generar modelos digitales del terreno y de superficies, y realizar análisis y visualizaciones detalladas utilizando métodos y técnicas especializadas. Este artículo se sumerge en los fundamentos, procesos y aplicaciones de la tecnología LiDAR, centrándose especialmente en el modelado geométrico de nubes de puntos. A lo largo del artículo, se examinan las fases de adquisición de datos LiDAR, el procesamiento de nubes de puntos, los métodos para el modelado de la nube de puntos, y se exploran diferentes tipos de modelos digitales, como el Modelo Digital de Terreno (MDT) y el Modelo Digital de Superficie (DSM). Finalmente, se discuten diversas aplicaciones en campos tan variados como la climatología, hidrología, geografía, topografía, y más. Este artículo busca proporcionar una visión integral de la tecnología LiDAR y su contribución en la generación de modelos digitales para una amplia gama de aplicaciones.

2. LiDAR

Para entender correctamente el tema del que trata el presente artículo se puede comenzar con la tecnología utilizada para tal fin. Según Esri (s.f.), el LiDAR (de light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y y z. Esta tecnología puede resultar familiar, pues tal como menciona IBM, funciona bajo el mismo principio que el radar o el sonar. Estas tres tecnologías emiten ondas de energía para detectar y rastrear objetos, de las cuales el LiDAR utiliza ondas de luz reflejada, lo cual

permite medir la distancia más rápidamente y con mayor precisión (IBM, s.f.).

Lo que se conoce actualmente como LiDAR puede interpretarse tanto una técnica para recolección de datos espaciales, así como el sensor que cumple esta función. Esta tecnología requiere de un equipo especializado para su funcionamiento, el cual consiste principalmente en cuatro elementos los cuales, según menciona ACI USA Inc. (s.f.), consisten en: el escáner láser que envía y recibe los pulsos de luz, el sensor que detecta los pulsos reflejados, un GPS incorporado que registra las coordenadas georreferenciadas del punto en el que está ubicado y un sistema inercial que mide la orientación y el movimiento del sistema. De esta manera se obtienen puntos con coordenadas precisas de manera rápida, llegando a emitir hasta 160000 pulsos por segundo.

3. Adquisición de datos LiDAR

Existen diferentes formas de ejecutar un sistema LiDAR, las cuales pueden dividirse en dos tipos principales: el LiDAR aerotransportado, el cual hace uso de un vehículo aéreo, tripulado o no tripulado, para obtener modelos 3D de una zona determinada; y el LiDAR terrestre, el cual se encuentra directamente en el terreno, siendo utilizado para modelos más pequeños o detalles específicos de una zona u objeto. Para ejecutar un sistema LiDAR aerotransportado se hace uso de un escáner láser aerotransportado (ALS), mientras que para el terrestre se hace uso de un escáner láser terrestre (TLS), cuyos términos se determinan de la siguiente manera:

El escáner láser terrestre es un instrumento que permite capturar la geometría y el color de objetos o escenas tridimensionales, mediante la emisión y recepción de pulsos de luz láser. El TLS funciona de la siguiente manera: El escáner láser emite un haz de luz láser infrarroja sobre un espejo giratorio que pinta con luz el entorno circundante (Faro, 2023). Cuando el haz de luz incide sobre un objeto o superficie, parte de la luz se refleja y vuelve al escáner, donde un sensor mide el tiempo que tarda en regresar. Con este dato, se puede calcular la distancia entre el escáner y el punto reflejado, así como su posición angular, gracias a unos codificadores que registran la rotación del espejo y del escáner. De esta forma, se obtienen las coordenadas tridimensionales de cada punto, que se almacenan en un archivo digital, formando una nube de puntos. Además, el escáner láser terrestre cuenta con una o varias cámaras fotográficas, que capturan el color y la textura de los objetos, y las asocian a los puntos correspondientes. Así, se consigue una representación tridimensional del objeto o escena escaneada, con un alto nivel de detalle y precisión. El escáner tiende a instalarse de manera estática sobre un

trípode, aunque también puede utilizarse sobre vehículo en movimiento (Arias & Mesa, 2020). Las aplicaciones comunes para este tipo de LIDAR son la ingeniería, minería, topografía y la arqueología (Esri, s.f.).

De manera similar a este escáner se tiene el ALS, el cual comparte varias de sus características. Este equipo consta de un distanciómetro láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión. Este desplazamiento lateral combinado con la trayectoria del avión permite realizar un barrido del terreno. El sistema mide la distancia del sensor al terreno a partir del tiempo que tarda el rayo de luz en alcanzar el suelo y regresar al sensor. Si conocemos las coordenadas y ángulos de actitud del avión y el ángulo del espejo, se pueden calcular a partir de estos datos y de las distancias medidas las coordenadas de los puntos (Ruiz & Kornus, 2003). Una variante del escáner láser aerotransportado es el batimétrico. Esta variante, también conocida como ALB (Airborne LiDAR Bathymetry) funciona por medio de un escáner aerotransportado, con la diferencia de que se utilizan dos tipos de luz láser: verde e infrarrojo. Se selecciona la luz verde para la detección del fondo del mar debido a que es la longitud de onda que penetra las aguas costeras con menor atenuación. La luz infrarroja penetra muy poco, por lo que es utilizada para la detección de la superficie del mar (Guenther et al, 2000). Con esta tecnología se recopilan simultáneamente información de la profundidad del agua y la elevación del terreno, y se proporciona un elevamiento topográfico de la interfaz tierra-agua (Velasco et al, 2014).

El producto entregado por todas estas tecnologías es generalmente una nube de puntos, la cual puede ser definido de la siguiente manera: “la nube de puntos en un conjunto de coordenada XYZ en un sistema de referencia común, que le muestra al espectador una comprensión de la distribución espacial de un objeto en el sitio. También se puede incluir información adicional como un valor de intensidad o un valor RGB”. (Reshetyuk, 2009). Aunque puede realizarse con base en coordenadas arbitrarias, se tiene estandarizado el uso de coordenadas georeferenciadas para poder obtener mayor nivel de precisión. En el caso de requerir de varias nubes de puntos de diferentes escaneos, se deben transformar los conjuntos de datos a partir de sus respectivos sistemas internos hacia un sistema definido externamente (Falip, 2009), el cual es generalmente el utilizado por las antenas GNSS (WGS 1984) o un sistema de referencia estandarizado en el país. De esta manera se obtiene como producto inicial una nube de puntos georeferenciada, con la cual se pueden generar distintos modelos para satisfacer una gran cantidad de aplicaciones.

A la hora de generar este producto se deben tener en cuenta ciertos parámetros de calidad, entre los cuales se pueden destacar los mencionados por Lorite et al. (2015), en donde se debe asegurar que la nube de puntos generada debe cumplir con las especificaciones técnicas de cada fase

con la que cuente el proyecto. Se debe comprobar que la nube de puntos cumpla con los requerimientos de densidad de puntos, recubrimientos transversales, área cubierta, resolución espacial, entre otros.

4. Procesamiento de nubes de puntos LiDAR

Las nubes de puntos LiDAR deben pasar por distintas etapas de procesamiento conforme a la finalidad que se le desee dar. Uno de los primeros procesos a realizar es la depuración de los puntos erróneos, los cuales no se encuentran ubicados acordes al terreno, teniendo valores de norte, este o cota exagerados, por lo cual tienden a encontrarse a simple vista. Arranz (2013) describe estos puntos como errores groseros, en los que se consideran puntos aéreos erróneos, puntos redundantes, puntos errores multi-camino y puntos sobre objetos móviles. Se deben eliminar estos puntos, pues al ser procesados generan errores con forma de picos o líneas. Esta fase no va directamente relacionada con la filtración del ruido de la nube de puntos, aunque puede realizarse simultáneamente. Una de las maneras de realizar esta depuración puede ser la definida por Arranz, Ormeño y Vicent (2012), quienes plantean que un parámetro para determinar estos errores puede basarse en la diferencia de cota que tenga el punto con respecto a los demás de su entorno, con lo cual, si se nota que se encuentra por encima de un umbral determinado, se considera como un error y puede ser eliminado de la nube de puntos.

Una vez realizada esta operación se procede a clasificar la nube de puntos. Albacete (2011), refiere que “la clasificación consiste en asignar atributos a los puntos registrados por el sistema LIDAR. Es decir, una vez obtenida la nube de puntos se puede definir como clasificación a la función que a cada retorno se le asigna un atributo o categoría”. Esta fase puede llegar a ser una de las más largas, por lo que se han implementando una gran cantidad de algoritmos con el propósito de realizar el proceso de manera automática, sin embargo, como menciona Vega (2021), no se tiene actualmente ningún algoritmo capaz de realizar el proceso en su totalidad, por lo que se enfatiza en que, a pesar de la utilidad y eficiencia que se puede obtener por medio de la clasificación automática, para obtener un mayor nivel de precisión se debe complementar con una clasificación manual posterior. La clasificación de la nube de puntos va acorde a ciertos atributos, los cuales se asignan en función de lo que se encuentre en el terreno. Los más comunes son el suelo, la vegetación, las edificaciones, las vías y el ruido en general. El estándar que se encuentra en la mayoría de programas es la de la Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Detección Remota (ASPRS, por sus siglas en inglés), la cual define la clasificación mediante las siguientes clases:

VALOR	DESCRIPCION
0	Creado, nunca clasificado
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación Baja
4	Vegetación Media
5	Vegetación Alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Punto clave del modelo (punto de masa)
9	Agua
10	Vía de tren
11	Vía
12	Puntos solapados
13	Alambre de protección
14	Alambre de conductor fase
15	Torre de transmisión
16	Alambre conector de estructura
17	Puente
18	Puntos altos (ruido)
19	Estructura aérea
20	Terreno ignorado
21	Nieve
22-39	Reservado para la ASPRS
40	Punto batimétrico
42	Superficie de agua
43	Superficie derivada de agua
43	Objeto sumergido
44	Objetos IOH S-57
45	Sin fondo en el punto batimétrico
46-255	Reservado para la ASPRS

Ilustración 1: Clasificación de nubes de puntos LiDAR según ASPRS.
Recuperado de Vega (2021).

La clasificación puede dividirse en dos fases, mencionadas por Porras, Cáceres y Gallo (2013) como segmentación y selección y extracción. La segmentación consiste en el proceso en el que se les dan etiquetas a ciertas zonas manualmente para ser clasificadas con una misma clase, agrupando la nube en objetos específicos. La segmentación puede realizarse de distintas maneras, teniendo en cuenta las zonas que tengan propiedades geométricas similares, características como intensidad, altura o información espectral, en la detección de formas específicas o bordes, áreas o volúmenes específicos, entre otros. La selección y extracción consiste en la elección de los atributos más relevantes de la nube de puntos con el fin de seleccionar los puntos más importantes de la nube de puntos, ya sea con el fin de filtrar la información relevante para el trabajo que se esté realizando, o también para resaltar estos puntos por encima del resto de la nube de puntos.

Como resultado de la clasificación se tiene una nube de puntos agrupada por distintas clases que representan los objetos que se desea representar o aquellos que se desea omitir. El siguiente procedimiento consiste en la filtración de los puntos que se desea utilizar. Como se menciona anteriormente, se pueden extraer clases con distintas

características para satisfacer una función específica, sin embargo, a diferencia de la selección y extracción, en este punto se busca utilizar solamente las clases filtradas. Un buen ejemplo de esto es un concepto que se detallará más adelante, el de un modelo digital de elevación (MDE), en el cual se requiere únicamente de los puntos correspondientes al nivel del suelo para generar el modelo, pues es el único atributo que se requiere delimitar.

5. Métodos para realizar el modelado de la nube de puntos LiDAR

Para generar un modelo digital de elevación, se debe contar con una estructura que evite que se generen huecos en la nube de puntos. Esta estructura es uno de los puntos más relevantes para este trabajo, pues es con base en ésta que se puede realizar el modelado de la nube de puntos. Los métodos más comunes para la realización de modelos digitales son la triangulación, las mallas poligonales y los modelos de superficie.

Aunque estos son los métodos más convencionales, existen otros métodos que se pueden utilizar para este fin. Una de las formas más comunes de clasificar el enfoque del modelado según la estructura generada es la triangulación. Esta consiste en conectar los puntos de la nube mediante segmentos de recta para formar triángulos, que son los elementos básicos de una superficie poligonal. Existen varios algoritmos para realizar la triangulación de una nube de puntos, como los derivados de Delaunay o Voronoi. Esri (s.f.) define a la triangulación de Delaunay como “Una técnica para crear una malla de triángulos contiguos y no superpuestos a partir de un dataset de puntos. Cada círculo al que se circunscribe el triángulo no contiene ningún punto del dataset en su interior.” El algoritmo de esta triangulación se basa en el establecimiento de unos puntos ajenos a la nube de puntos dato y externos a esta (puntos ficticios), marcando los límites de actuación. Estos puntos generarán triángulos con los puntos exteriores de la nube por los cuatro costados (norte, sur, este y oeste), de tal manera, que se genera una superficie total siempre convexa. Utilizando esta información, se podrían determinar qué puntos están unidos con estos puntos ficticios y utilizar los lados de los triángulos generados con estos para la formación del límite exterior de la nube de puntos. El proceso es rápido y sencillo y no implica el cálculo de toda la triangulación de la nube de puntos (Arranz, 2012). Con un comportamiento similar existe el algoritmo de Voronoi, el cual funciona con base en los diagramas de Voronoi, definidos por Polanco (2020) como la división de un espacio en regiones, de forma que a cada punto de una nube de puntos se le asigna la región del espacio cuya distancia es la menor a cualquier otro punto. De esta forma, las zonas cuya distancia es equidistante entre dos o más puntos son los límites de los polígonos que se forman en la nube de

puntos. La triangulación de Voronoi tiene algunas limitaciones o desventajas, como que puede ser sensible al ruido o a la distribución de los puntos, que puede generar regiones muy grandes o muy pequeñas, que puede requerir de mucho tiempo de cómputo o de memoria para su construcción o visualización, y que puede no ser adecuada para representar superficies curvas o complejas (Villatoro, 2017).

Existe también un método denominado malla poligonal, el cual Cano (2015) describe como una representación poligonal de una forma modeladas como muchas superficies planas, generalmente utilizando triángulos como polígonos para este fin. Una malla poligonal es un conjunto de caras representadas como polígonos, de forma que las intersecciones entre caras forman o bien una arista, o bien un vértice, y que la unión de todas las caras o polígonos forma una superficie continua. De esta forma es posible representar cualquier superficie como un conjunto de polígonos conectados entre sí, con el único requerimiento de que localmente formen una superficie conectada, única y coherente, es decir, evitando puntos donde coinciden más de una superficie, vértices aislados o aristas compartidas por más de dos polígonos (Hernández, 2019). Como se menciona en España et al. (2008), las nubes de puntos se procesan mediante mallas de triángulos con el objetivo de compensar los errores debidos a no tener una línea de visión clara o demasiado alejada del objeto a escanear. A partir de esto, puede deducirse que la malla poligonal consiste en una triangulación de manera masiva con el fin de generar un modelo lo más similar posible a una zona u objeto con base en polígonos. Sin embargo, las mallas poligonales no pueden realizarse únicamente con triángulos. Otros métodos para realizar las mallas poligonales son por medio de cuadriláteros estructurados o cuadriláteros no estructurados (Hernández, 2019). Dentro de las mallas por medio de cuadriláteros estructurados se pueden mencionar las mallas hechas a partir de una grilla (grid), en las que los puntos se sitúan de manera regulada y la elevación se asigna a un área o píxel por medio de métodos de interpolación (Extremera, 2019). Discretizar el espacio a una resolución da lugar a que la celda esté ocupada por varios o por ningún punto, por lo que el modelo puede resultar inconsistente en distintas partes, por lo que no tiende a ser un método poco utilizado.

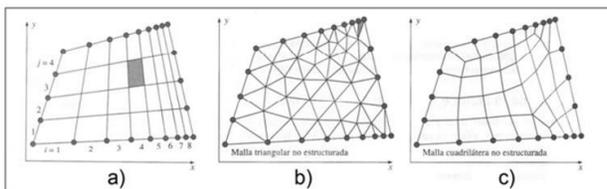


Ilustración 2: Tipos de mallas poligonales. Fuente: Hernández (2019).

Si bien se obtiene un buen nivel de precisión obtenido a partir de las mallas poligonales, éstas pueden no ser del todo cómodas al tener una forma tan rugosa o interrumpida. Un método con el que se pueden suavizar estos errores son los modelos de superficie, mencionados por Cano (2015), los cuales utilizan algoritmos de interpolación sobre la malla poligonal con el fin de generar curvas que hagan del modelo algo más sofisticado y similar a la realidad. Estas superficies tienen el beneficio de ser más ligeras y cómodas, por lo que son ideales para representar obras arquitectónicas o artísticas. Por el contrario, pueden resultar un poco menos precisas si se requiere del uso de puntos de control o de coordenadas precisas de una zona determinada, pues estos datos pueden llegar a perderse con la interpolación a partir de curvas, aunque en algunos casos esta diferencia puede considerarse despreciable.

6. Tipos de modelos digitales

La modelización del terreno resulta de vital importancia en multitud de áreas como la climatología o la hidrología entre otras, siendo en muchas ocasiones uno de los factores determinantes de la calidad de sus estudios (Brótons, et al., 2010).

Una acepción de la palabra modelo, originada en ámbitos geográficos, lo define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988). De la definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que, por lo tanto, se ve representado por otro objeto de menor complejidad, por lo que se puede deducir que el modelo de un terreno busca ser una representación parcial de un área determinada.

La denominación MDT (modelo digital de terreno) es la genérica para todos los modelos digitales, incluyendo los DEM (modelo digital de elevación), en los cuales la coordenada Z se refiere siempre a la elevación sobre el terreno y a los demás tipos de modelos en los que la Z puede ser cualquier variable (profundidad de suelo, número de habitantes...) (IGAC, 2010). Puede definirse al MDT como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del terreno (Felicísimo, 1994). Existen algunas variantes del DTM acorde a las cualidades que se desean conservar, así como el ya mencionado DEM. El modelo digital de terreno es, a grandes rasgos, un sinónimo del modelo digital de elevación, aunque en algunos contextos pueden encontrarse diferencias. Otro tipo de modelo bastante utilizado es el modelo digital de superficie (DSM – MDS), el cual consiste en una variante del MDT en el cual se incluye la mayor cantidad de información posible recibida por el sensor LiDAR. El PNOA (s.f.) lo define de manera

simplificada como “un modelo digital con obstáculos, en el que se representa la superficie más elevada sobre el terreno, sea de origen natural o artificial”. Mientras que el DEM define solamente los puntos más bajos de la nube de puntos para generar su modelo, el DSM es definido a partir de todos los objetos que se encuentran en él, incluidos los edificios, puentes, vegetación, etc (Esri, s.f.).

7. Aplicaciones

Las aplicaciones que tienen los modelos digitales generados a partir de nubes de puntos LiDAR abarcan una gran cantidad de áreas y disciplinas, de manera que se plantean algunos ejemplos específicos sobre la manera en la que se pueden aprovechar estos recursos: En la zonificación de riesgos, Crespo, Menéndez y Fernández (2012) emplean un modelo digital de terreno para describir áreas con distintas frecuencias de inundación, destacando su utilidad en la gestión de desastres naturales. Yero, Álvarez y Pérez (2023) amplían las aplicaciones, señalando su relevancia en la planificación urbana, administración de redes eléctricas y desarrollo catastral. Además, en Batty et al. (2000), se presenta un análisis exhaustivo del estado del arte y la implementación de modelos digitales para el diseño de ciudades virtuales. En el campo de la arqueología, Moralejo et al. (2022) ejemplifican el uso de Modelos Digitales de Terreno (MDT) generados con LiDAR para el estudio de sitios históricos como El Shincal de Quimivil. Este enfoque avanzado preserva y revela detalles significativos del patrimonio cultural. En el ámbito medioambiental, González (2012) utiliza MDT para determinar parámetros dosimétricos en Galicia, contribuyendo a la gestión sostenible de recursos. En Montealegre, Lamelas y De la Riva (2014), se refuerza esta idea, pues se señala la importancia de la calidad de los DTM para la normalización de las áreas de vegetación. Collado (2017) aplica estos modelos para estudios detallados de análisis y variación del paisaje, aportando a la comprensión de cambios ambientales a lo largo del tiempo. Cano (2015) resalta también las aplicaciones que se pueden dar en la industria, pudiendo ser utilizados para modelar componentes industriales para su diseño o control de calidad. Además de esto, se puede encontrar otras aplicaciones orientadas a la geografía o a la topografía. Palacio, López & Ortiz (1991) utilizan esta tecnología para conocer acerca de las formaciones geomorfológicas, mientras que Ramírez (2002), destaca la facilidad que ofrecen los MDT para la delimitación de drenajes naturales y sus respectivas cuencas hidrográficas.

8. Conclusiones

En conclusión, la aplicación de la tecnología LiDAR para la generación de modelos digitales se destaca por su versatilidad en diversas disciplinas, desde la zonificación de riesgos naturales hasta la preservación del patrimonio arqueológico y la planificación urbana. En el proceso de adquisición de datos LiDAR, tanto aerotransportado como terrestre, se utilizan escáneres láser especializados que emiten pulsos de luz para obtener nubes de puntos tridimensionales georreferenciadas. El procesamiento de estas nubes de puntos implica la depuración, clasificación y filtración, asegurando la calidad y precisión de los datos.

La tecnología LiDAR se vislumbra como un componente clave para el futuro de la generación de modelos digitales en diversas aplicaciones. Su capacidad para proporcionar datos tridimensionales precisos y detallados ofrece oportunidades significativas para avances en disciplinas como la climatología, hidrología, arqueología, y más. En el futuro de esta tecnología, se vislumbra una mayor automatización y eficiencia en todos los aspectos del proceso, desde la adquisición hasta el modelado final. La integración de algoritmos más avanzados, respaldados por técnicas de clasificación manual, promete una evolución significativa en la precisión y rapidez de la generación de modelos. La continua evolución de esta tecnología promete contribuir aún más a la comprensión y gestión de nuestro entorno.

Referencias

- ACI USA Inc. (s.f.). Guía completa de topografía LIDAR. Recuperado de: <https://acicorporation.com/espanol/guia-completa-de-topografia-lidar/>
- Arias, L. E. & Mesa, J. L. (2020). Metodología para generación de Modelos Digitales De Terreno Topobatimétricos a partir de integración de datos de sensores remotos LiDAR aéreo, Ecosonda Monohaz y Topografía Convencional usando herramientas SIG. *Universidad Antonio Nariño*. Recuperado de: <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2145/2/2020LuisEnriqueAriasMart%c3%adnez.pdf>
- Arranz Justel, J. J., Ormeño Villajos, S., & Vicent García, J. M. (2012). Algoritmo para la clasificación de nubes de puntos LiDAR en entornos urbanos: discriminación entre vegetación y edificaciones. Recuperado de: <https://oa.upm.es/21209/>
- Arranz, J. J. (2013). Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía*. Recuperado de: https://oa.upm.es/15056/1/JOSE_JUAN_ARRANZ_JUSTEL_B.pdf
- Batty, M., Chapman, D., Evans, S., Haklay, M., Kueppers, S., Shiode, N., ... & Torrens, P. M. (2000). Centre for Advanced Spatial Analysis University College London 1-19 Torrington Place Gower Street London WC1E 6BT. Recuperado de: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30656886/paper26->

libre.pdf?1391774902=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DVisualising_the_city_communicating_urban.pdf&Expires=1700200370&Signature=X7mS~yfyJSPJdtZgzRon0puBppFx5TWICEZ5O6RafBFuRyjOfw4LmrdYchQ0xoW0UdjNxxQGRA--8W5F447bEI1eHo2WqwUmDpc3x3m5dE~544KTdEKfi-uZXBorJq8m7QVA8LjIK35mYBYASnZcZbWjE3~QvdDOMWXeMgeyhIODJ0OrN~Bhl4OM6EDZGIP2c9SryPNbDbDGLdLQmEfYZJKnPy6vyF7czzu~ojOdwBkgdxAlUwfoNMfZ0~xiqG6Td53c6DOWslUnxJQ99V9RoM~Jj6m6sPVgbVFSWRLKeVK8yTXPipql2GtaEF-5kLKhIE4VPfRn5RhfoW3~jEX~Kg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Cano, R. A. (2015). Técnicas y herramientas de procesamiento de nubes de puntos tridimensionales. *Universidad Carlos III de Madrid*. Recuperado de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22336/PFC_Ruben_Artes_Cano.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Collado Latorre, J. C. (2017). Aplicación de la tecnología LiDAR en el análisis visual de la valoración del paisaje. *Universitat Politècnica de València*. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86221/COLLADO%20-%20APLICACION%20DE%20LA%20TECNOLOGIA%20CDA%20LiDAR%20EN%20EL%20ANALISIS%20VISUAL%20DE%20LA%20VALORACION%20DEL%20PAISAJE.pdf?jsessionid=DC4BE0D03D4CB854FAB1081FC34FBAB9?sequence=1>

Crespo, J., Menéndez, R., & Fernández, E. (2012). Aplicación de modelos digitales del terreno generados a partir de tecnología LIDAR en la caracterización de zonas inundables. *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012. XII Reunión Nacional de Geomorfología*, 267-271. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Elena-Fernandez-Iglesias/publication/336640382_Aplicacion_de_Modelos_Digitales_del_Terreno_generados_a_partir_de_tecnologia_LIDAR_en_la_caracterizacion_de_zonas_inundables/links/5da96d7b92851c577eb81b00/Aplicacion-de-Modelos-Digitales-del-Terreno-generados-a-partir-de-tecnologia-LIDAR-en-la-caracterizacion-de-zonas-inundables.pdf

España, M., Moreno, J. J., Martín, D. & Cano, P. (2008). Herramientas para la triangulación y registro de modelos 3D a partir de nubes de puntos. *Grupo de Investigación en Informática Gráfica. Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos. Universidad de Granada*. Recuperado de: <https://diglib.org/bitstream/handle/10.2312/LocalChapterEvents.CEIG.CEIG08.261-264/261-264.pdf?sequence=1>

Esri (s.f.). ¿Qué son los datos LIDAR? *ArcGIS Desktop*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm#:~:text=El%20LIDAR%20%28light%20detection%20and%20ranging%29%20es%20una,que%20se%20pueden%20visualizar%20y%20analizar%20usando%20ArcGIS>.

Esri (s.f.). Administrar datos de elevación, parte 1: Acerca de los datos de elevación. *ArcGIS Desktop*. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/wkflw-elevation-part1.html>

Esri (s.f.). Tipos de LIDAR. *ArcGIS Desktop*. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.html>

Esri (s.f.). Triangulación de Delaunay. *Diccionario SIG de Esri Support*. Recuperado de: <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/delaunay-triangulation>

Extremera, J. (2019). Generación de modelos digitales de terreno y de superficies a partir de información capturada por sensores LiDAR aerotransportados. *Universidad de Jaén*. Recuperado de: https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/14255/1/MEMORIA_TFG.pdf

Falip, S. (2015). Agrimensura 3D con tecnología LiDAR. *Universidad Nacional de La Plata*. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/77136/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Faro (2023). Comprender los escáneres láser. Recuperado de: <https://www.faro.com/es-MX/Resource-Library/Article/understanding-laser-scanners>

Felicísimo, Á. M. (1994). Modelos digitales del terreno. *Oviedo: Pentalfa*. Recuperado de: <https://www.thedigitalmap.com/EasyDEM/ayuda/html/documentos/libroMDTFelicisimo.pdf>

González Ferreiro, E. (2012). Aplicación de LiDAR aerotransportado en la generación de modelos digitales del terreno y en la estimación de variables dasométricas. Recuperado de: <https://investigacion.usc.gal/documentos/5d1df67629995204f766ca6d>

Guenther, G. C. & Grant, A. G. & LaRocque, P. E. & Reid, D. J. (2000). Meeting the accuracy challenge in Airborne LiDAR Bathymetry. *NOAA, National Ocean Service*. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20160304225500/http://www.fugro-pelagos.com/lidar/lib/papers/MeetingAccuracyChallenge.pdf>

Hernández, J. M. (2019). Tratamiento de nubes de puntos mediante herramientas CAD. *Universidad de Valladolid*. Recuperado de: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/36750/1/TFG-I-11116.pdf>

IBM (s.f.). ¿Qué es LiDAR? <https://www.ibm.com/es-es/topics/lidar>

IGAC. (2010). Generación del Modelo Digital de Terreno – DTM. *Manual de procedimientos*. Recuperado de: https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/listadomaestro/p30400-02-10v2_generacion_del_modelo_digital_de_terreno_-_dtm.pdf

Joly, F. (1988): La cartografía. Oikos-Tau. Barcelona.

Lorite, S. M. & Ojeda, J. C. & Rodríguez-Cuenca, B. & González, E. & Muñoz, P. (2015). Procesado y distribución de nubes de puntos en el proyecto PNOA-LiDAR. *Instituto Geográfico Nacional, Madrid*. Recuperado de:

- https://pnoa.ign.es/resources/archivos/pdf/Procesado_distribucion_nubes_puntos_proyecto_PNOA-LiDAR.pdf
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T. & De la Riva, J. (2014). Evaluación de métodos de interpolación utilizados en la creación de modelos digitales de elevaciones para la normalización de la nube de puntos LIDAR-PNOA en aplicaciones forestales. *Departamento de Geografía y O.T., Universidad de Zaragoza*. Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/46429/1/2014_Montealegre_et_al_Congreso-TIG.pdf
- Moralejo, R. A., López, L., Gobbo, J. D., & del Cogliano, D. H. (2022). Análisis comparativo de modelos digitales del terreno obtenidos con LiDAR aéreo y *structure from motion*: aplicación en estudios del paisaje en el sitio inka El Shincal de Quimivil (Noroeste argentino). Recuperado de: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/216948/CONICET_Digital_Nro.c64a6ed2-defd-4024-9ad9-4090b9be0179_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. (2010): Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LIDAR. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla*. Sevilla. Pp. 254-271. ISBN: 978-84-472-1294-1.
- Palacio Prieto, J. L., López Blanco, J., & Ortiz Pérez, M. A. (1991). Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno. *Investigaciones geográficas*, (23), 89-101. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n23/n23a5.pdf>
- PNOA (s.f.). Modelo digital de superficies (DMS). Recuperado de: <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/modelo-digital-de-superficies>
- Polanco Gallego, P. R. (2020): Algoritmo para la paralelización en GPU de diagramas de Voronoi. *Universidad de Chile*. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/179076/Algoritmo-para-la-paralelizacion-en-GPU-de-diagramas-de-Voronoi.pdf?sequence=1>
- Porrás Díaz, H. & Cáceres Jiménez, J. J. & Gallo Lancheros, E. O. (2013). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre. *Universidad Industrial de Santander*. Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7028/8709>
- Ramírez Osorio, J. M. (2002). Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno. *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado de: http://aqua.upc.es/crahi/ftp_homes/corral/crahi/docus/Extraccion%20Automatica%20de%20Redes%20de%20Drenaje.pdf
- Reshetnyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. *Royal Institute of Technology – KTH. Estocolmo, Suecia*.
- Ruiz, A., & Kornus, W. (2003). Experiencias y aplicaciones del LiDAR. V Semana Geomática de Barcelona, 11(03).
- San José Albacete, A. (2011). Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10.
- Vega, J. C. (2021). Generación de una metodología para el procesamiento de nubes de puntos LIDAR mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV, en el campus ESPE, SANGOLOQUÍ. *Universidad de las Fuerzas Armadas*. Recuperado de: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25967/1/T-ESPE-044801.pdf>
- Velasco, J. & Molina, I. & Martínez, E. & Arquero, Á. & Prieto, J. F. (2014). Sea Bottom Classification by Means of Bathymetric LIDAR Data. Recuperado de: https://oa.upm.es/33100/1/INVE_MEM_2014_154928.pdf
- Villatoro, F. R. (2017). Visualizar el fútbol con triangulaciones de Delaunay y diagramas de Voronoi. *La ciencia de la mula Francis*. Recuperado de: <https://francis.naukas.com/2017/03/15/diagramas-de-voronoi-en-el-futbol/>
- Yero Cabrales, Y., Álvarez Romero, A., & Pérez García, J. C. (2023). Empleo de nubes de puntos LiDAR para la obtención de modelos digitales del terreno y otros productos. *Revista Cubana De Geomática*, 2(1). Recuperado de: <https://geomatica.geocuba.cu/rcg/article/view/67>