

Universidad de Salamanca | Grado en Ingeniería Informática

Sensores LIDAR

Berrocal Macías, David

López Sánchez, Javier

Mateos Pedraza, Alejandro



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Abstract: The main objective of this essay is to provide the reader with introductory notions to the field of LIDAR sensors, their physical principles of operation and real-world applications. It also offers a future perspective on the influence of these sensors on technology and research in the upcoming years.

Keywords: LIDAR, sensors, laser, self-driving cars

Índice de Contenidos:

I.	Estado del Arte	3
II.	Breve historia del LIDAR	2
III.	Tecnología LIDAR	3
1.	Principios de funcionamiento y técnicas elementales	3
2.	Plataformas LIDAR	5
3.	Representación de la información	6
IV.	Ventajas e inconvenientes de la Tecnología LIDAR	7
V.	Especificaciones de un sensor LIDAR comercial: Velodyne LiDAR Puck (VLP-16)	8
VI.	Aplicaciones actuales de los sensores LIDAR	9
1.	LIDAR en la gestión del medio terrestre y entornos fluviales	9
1.1.	Ventajas e inconvenientes de la aplicación del LIDAR a los entornos naturales	10
2.	LIDAR en la conducción autónoma	11
2.1.	Longitud de onda más larga, mayor alcance.	12
2.2.	Limitaciones y objetivos a futuro	13
VII.	Referencias	14

I. Estado del Arte

El acrónimo LIDAR (Light Detection and Ranging) es el término empleado para referirse al método actualmente admitido para generar información espacial precisa y geográficamente referenciada sobre la forma y las características de la superficie de la Tierra. Los recientes avances en los sistemas de cartografía con LIDAR y las tecnologías -sensores, en particular- que los hacen posibles permiten a los científicos y profesionales de la cartografía examinar los entornos naturales y modificados por intervención humana en una amplia gama de escalas y con un grado de precisión, exactitud y flexibilidad nunca antes visto.

El sistema LIDAR se ha convertido en un método estándar para recopilar datos de superficie sumamente densos y precisos sobre paisajes, terrenos urbanos y naturales, zonas de aguas poco profundas y otros lugares de estudio de características similares. Esta técnica de teledetección activa puede parecer similar a la del radar común, si bien utiliza pulsos de luz láser en lugar de ondas de radio para la caracterización del medio. Típicamente, el sensor LIDAR es transportado por el aire, equipado en aviones o vehículos semejantes, con objeto de proporcionar datos de superficie sobre grandes áreas del terreno. No obstante, el LIDAR también suele equiparse en sistemas terrestres fijos y móviles; cada vez más, son populares entre las comunidades de topógrafos e ingenieros este tipo de técnicas para producir representaciones tridimensionales precisas y realistas de ferrocarriles, carreteras, puentes, edificios y otras estructuras industriales. Estas representaciones

resultantes comúnmente reciben el nombre de datasets de nubes de puntos, y consisten en un mapa donde podemos observar la concentración de los puntos de superficie detectados por el sensor en el área a estudiar.

El LIDAR, que, cabe citar, se escribe también en la terminología como LiDAR por alusión precisa al acrónimo y también se conoce como LADAR o altimetría láser, se basa en la emisión, alcance y detección de pulsos de luz. Concretamente, esta tecnología de teledetección produce haces de luz intensos y enfocados, y realiza una medición del tiempo que tarda el sensor en detectar los rayos reflejados. Esta información se utiliza posteriormente para calcular rangos, o distancias a los objetos del espacio de trabajo. Por analogía, podemos considerar el LIDAR hermano del radar (detección y alcance por radio), con la salvedad fundamental de que el sistema que aquí nos concierne se basa en pulsos discretos de luz láser. Las coordenadas tridimensionales (que llamaremos, por ejemplo, latitud, longitud y elevación) de los objetivos se calculan a partir de tres fuentes de información, a saber:

1. La diferencia de tiempo comprendida entre el pulso de láser que se emite y el pulso detectado de nuevo en la fuente.
2. El ángulo en el que fue disparado el pulso.
3. La ubicación absoluta del sensor en o sobre la superficie de la Tierra.

En capítulos posteriores veremos en detalle cómo se ha gestado todo este método y cuáles son las técnicas de medición y cómputo que colocan hoy en día al LIDAR dentro del selecto grupo de las tecnologías punteras en el ámbito de la teledetección y la visión artificial.

II. Breve historia del LIDAR

La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) se comenzó a desarrollar en la década de los 70. Su utilización de forma generalizada se vio frenada por su elevado coste y sus limitaciones para la época. Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) introducidos a finales de los años 80 proporcionaron la alta precisión posicional necesaria para poder usar LiDAR de alta resolución. Con la llegada y posterior evolución de los relojes ultra-precisos para medir el tiempo de retorno del pulso láser y las unidades de medida inercial (IMU) para calcular los parámetros de orientación de los sensores láser se pudo aumentar la fiabilidad y resolución de los sistemas LiDAR así como su empleo en una gran cantidad de aplicaciones.

La tecnología LIDAR hizo su aparición en la escena de la teledetección a principios de la década de 1960 tras la invención del láser (Goyer y Watson, 1963). Inicialmente, se utilizó en aplicaciones meteorológicas como la observación de las nubes y la cartografía de partículas en suspensión de la atmósfera. El primer instrumento LIDAR empleado en el espacio fue un altímetro láser a bordo de la misión APOLLO 15 a la Luna en 1971; éste se utilizó para medir la topografía del Satélite y la altura de su superficie para trazar un mapa del terreno lunar. La eficiencia, vida útil y resolución de la mayoría de la tecnología láser y del LIDAR espacial mejoraron drásticamente a finales de la década de 1980. Fue entonces cuando la NASA lanzó sus primeros sistemas de altimetría láser, el LIDAR Atmosférico y Oceánico de la NASA [NASA Atmospheric and Oceanic LIDAR] y el Cartógrafo Topográfico Aerotransportado [Airborne Topographic Mapper].

En 1994, la NASA lanzó un nuevo sistema LIDAR al espacio, embarcado en el Experimento de Tecnología Espacial (LITE) para ayudar a los investigadores y científicos a comprender mejor el clima global de la Tierra.

Se utilizó para recoger datos sobre la cobertura de nubes del Planeta y para rastrear diversas partículas atmosféricas como los aerosoles (NASA, 1994). Esta misión tenía por objeto también validar las tecnologías LIDAR de cara a las misiones a bordo de vehículos espaciales y obtener experiencia operacional que beneficiará al desarrollo de futuros satélites espaciales. La misión sólo funcionó durante 53 horas y cubrió 1,4 millones de kilómetros de la superficie terrestre, lo que dio lugar a una recopilación de 40 GB de datos. Posteriormente, se desarrollaron sistemas LIDAR comerciales a bordo de vehículos espaciales, aéreos y acuáticos, como el Satélite “Ice, Cloud and land Elevation” (ICESat) de la NASA y el satélite de observación de nubes, aerosoles e infrarrojos CALIPSO. Desde entonces, la tecnología ha sido mejorada e innovada por otras compañías como Velodyne, Leddartech, Luminar, Geoscience y Sweep, entre muchos otros. Hoy en día, estas empresas están desarrollando sistemas LIDAR más pequeños, ligeros, económicos y fáciles de usar, que puedan ser montados en UAVs, drones, vehículos y medios de transporte similares. El desarrollo de vehículos automatizados que sean capaces de auto-orientarse se plantea como el reto más ambicioso hasta la fecha en esta dirección.



Ilustración 1. Nube de puntos generada por un sensor Velodyne Alpha Puck. / Foto: Business Wire

III. Tecnología LIDAR

Los sistemas LiDAR se basan en la emisión de pulsos de luz láser desde una plataforma terrestre o aérea, de modo que una medición precisa del tiempo de retorno de cada pulso al sensor permite el cálculo de la distancia que lo separa tanto de la superficie terrestre como de los objetos existentes en ella. Como para cada pulso emitido se conocen posición y orientación del sensor, cada una de las señales de retorno cuenta con unas coordenadas tridimensionales únicas permitiendo la captura de forma remota de la información topográfica. Al basarse esta tecnología en sensores activos se evita la dependencia a la hora de capturar información de las condiciones meteorológicas, permitiendo incluso realizar las actividades con estos sensores por las noches.

Tras realizar el vuelo sobre una zona concreta se procesan los datos obtenidos en un procedimiento con diferentes fases (filtrado de la información, eliminación de ruido, corrección diferencial, ensamblaje de las diferentes pasadas realizadas). Una vez hecho el procesado se llevan a cabo una serie de operaciones para obtener los modelos digitales topográficos. El tratamiento de los datos LiDAR permite obtener tres modelos digitales diferentes: del terreno (MDT), de elevaciones (MDE) y de información intermedia. El formato de los productos LiDAR es normalmente ejecutable de forma sencilla por sistemas SIG y CAD.

1. Principios de funcionamiento y técnicas elementales

La idea básica y central de todo sistema LIDAR es sumamente sencilla: consiste, como ya hemos adelantado, en medir el tiempo que tarda un pulso de láser en alcanzar un objeto y regresar al sensor (que a su vez tiene una ubicación conocida y georeferenciada para el equipo de investigación), determinar la distancia utilizando el tiempo de recorrido del haz, registrar el ángulo del láser y, posteriormente, a partir de esta información, calcular dónde se

encuentra el objeto que ha reflejado el pulso en un espacio tridimensional. Sin embargo, en una exploración aérea real, cuando se trata de lograr un alto nivel de precisión, el proceso se complica, dado que es importante conocer, con un margen de error de un centímetro, aproximadamente, dónde se encuentra el avión mientras sobrevuela el terreno a velocidades de 100 o 200 millas por hora, a medida que el sensor efectúa la emisión cientos de miles de pulsos del LIDAR por segundo. Afortunadamente, diferentes tecnologías, especialmente el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los giróscopos de alta precisión, se han incorporado a este campo para facilitar el trabajo de investigación a los científicos.

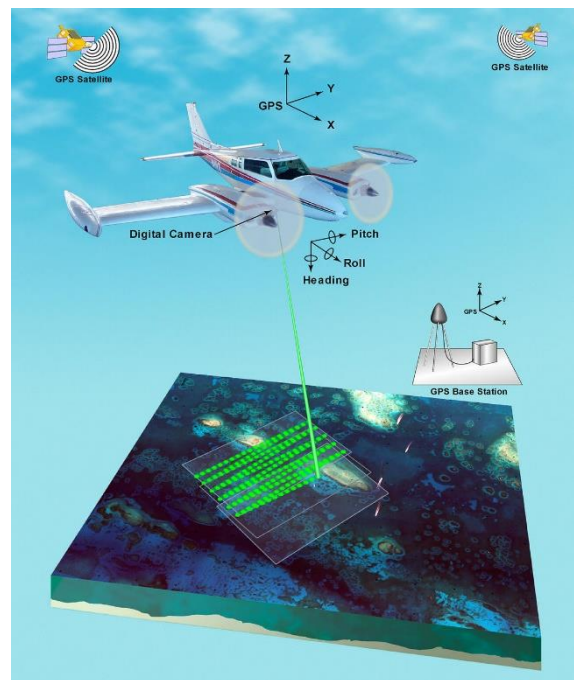


Ilustración 2. Airborne LIDAR (Ilustrado). | Foto: USGS

Podemos afirmar que existen dos clases de tecnologías de teleobservación, que se diferencian entre sí por la fuente de energía utilizada para detectar el ente objetivo: los sistemas pasivos y los sistemas activos. Los sistemas pasivos detectan la radiación generada por una fuente de energía externa, como el Sol, mientras que los sistemas activos generan y dirigen la energía hacia un objetivo y posteriormente detectan la radiación. En este sentido, los sistemas LiDAR son sistemas

activos porque emiten pulsos de luz (esto es, los rayos láser) y detectan la luz reflejada por el objeto en cuestión. Esta característica permite que los datos del LiDAR se recojan de noche, cuando el aire suele estar más limpio y el cielo contiene menos tráfico aéreo. De hecho, la mayoría de los datos del LIDAR se recogen de noche. Sin embargo, a diferencia del radar, el LIDAR no puede penetrar en las nubes, la lluvia o la densa neblina, y debe ser transportado en vuelos de larga duración. Los instrumentos del LIDAR son capaces de realizar mediciones a tasas de muestreo superiores a los 150 kilohercios (es decir, 150.000 pulsos por segundo). El producto resultante es una red densamente poblada de puntos de distancia georreferenciados con gran precisión, -a menudo llamada nube de puntos, como se ha dicho-, que más tarde puede emplearse para generar representaciones tridimensionales de la superficie de la Tierra y sus características. Muchos sistemas LIDAR funcionan en regiones próximas al infrarrojo del espectro electromagnético, aunque algunos sensores también funcionan en la banda verde para penetrar en el agua y detectar características del fondo. Estos sistemas batimétricos de LIDARs pueden utilizarse en zonas con agua relativamente clara para estudiar las cumbres del fondo marino. Típicamente, los resultados derivados de los LIDARs tienen precisiones absolutas de unas 6 a 12 pulgadas (15 a 30 centímetros) para los datos más antiguos y de 4 a 8 pulgadas (10 a 20 centímetros) para los registros más recientes; las medidas de precisión relativas (por ejemplo, las alturas de los tejados, las colinas y las dunas) son incluso mejores.

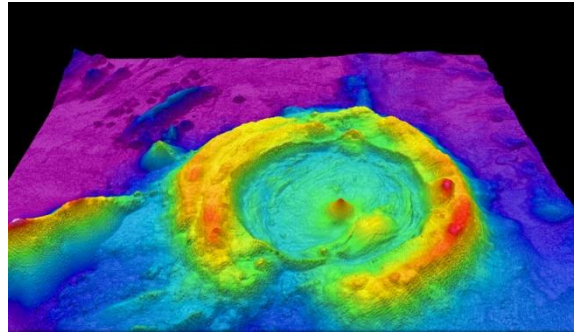


Ilustración 3. Nube de puntos generada por un LIDAR batimétrico para el estudio de la geología submarina. / Foto: NOAA

La capacidad de "ver más allá de los árboles" es un objetivo recurrente cuando se trata de la adquisición de datos de elevación del terreno utilizando datos de teleobservación recogidos en una vista aérea de la superficie de la Tierra (por ejemplo, desde aviones o satélites). La mayoría de los conjuntos de datos generados a gran escala con este fin se han conseguido utilizando tecnologías de teleobservación que no son capaces de penetrar en la vegetación. Si bien el LIDAR no es una excepción, sin embargo, es común contar con suficientes puntos individuales como para que, aunque sólo un pequeño porcentaje de ellos haya conseguido tocar el suelo a través de los árboles, tengamos información suficiente para proporcionar una cobertura adecuada en las zonas boscosas. Efectivamente, se ha comprobado el éxito del LIDAR para ver a través de pequeñas áreas descubiertas en la vegetación. Sin embargo, los bosques densos o las zonas completamente cubiertas (como la selva tropical) suelen ofrecer pocas oportunidades y, por lo tanto, lo más frecuente es recibir una representación deficiente del suelo, pues todos los puntos caen sobre los árboles. Una regla empírica en este sentido consiste en afirmar que si es posible mirar hacia arriba y ver el cielo a través de los árboles, entonces esa ubicación se puede medir con el LIDAR. Por esta razón, los estudios realizados con sistemas LIDAR en épocas donde la vegetación se ve despojada de sus hojas, son útiles para medir las características del terreno en las zonas más frondosas.

Los sistemas LIDAR han avanzado considerablemente. Las primeras unidades comerciales eran capaces de emitir 10.000 puntos de láser por segundo (10 kilohercios) y eran grandes y voluminosas; y, por consiguiente, arduas de transportar. Los sistemas más recientes son más compactos, mucho más ligeros, tienen mayor precisión angular y pueden procesar múltiples retornos de láser al instante (es decir, se emite un segundo disparo de láser antes de que se reciban los retornos del disparo anterior), lo que permite frecuencias de emisión de pulsos de luz superiores a los 300.000 pulsos por segundo (300 kilohercios). Esto permite aumentar la cantidad de datos obtenidos en un 30% e incrementa la capacidad de observación de la estructura tridimensional del suelo terrestre.



Ilustración 4. Imagen LIDAR de una zona forestal. / Foto: Atticus Stovall

2. Plataformas LIDAR

Los sistemas LIDAR topográficos aerotransportados son los sistemas LIDAR más comunes. La combinación de una plataforma de transporte aéreo y un sensor LIDAR ha demostrado ser una técnica efectiva y eficiente para recoger datos en áreas de decenas o miles de metros cuadrados de extensión. Para áreas más pequeñas, o donde se requiere una mayor densidad de datos recogidos en el dataset, los sensores LIDAR también pueden desplegarse en helicópteros y plataformas terrestres (o acuáticas) fijas y móviles. En primera instancia, el LIDAR fue desarrollado como un instrumento de posición fija en tierra para los estudios de la composición atmosférica, reconocimiento de

estructuras terrestres y observación de las nubes; y, por descontado, continúa siendo una herramienta poderosa para el análisis climático en todo el mundo.

Los sensores LIDAR también pueden ser montados en trípodes de posición fija para escanear objetivos específicos como puentes, edificios o incluso playas y zonas costeras. Los sistemas LIDAR basados en trípodes producen datos puntuales con una precisión de centímetros y se utilizan a menudo en aplicaciones de cartografía del terreno muy localizadas que requieren un estudio continuo y frecuente. Asimismo, los sistemas modernos de navegación y posicionamiento permiten utilizar plataformas móviles terrestres y acuáticas para reunir datos con este tipo de sensores. Tales equipos resultan ideales para ser empleados en vehículos deportivos y todoterreno -y si ponemos el ojo en la tecnología de los próximos años, en los vehículos de conducción autónoma- dado que son capaces de realizar un mapa del terreno a distancias de un kilómetro, aproximadamente. Los datos recogidos en dichas plataformas móviles son muy precisos y se utilizan ampliamente para trazar mapas de zonas discretas, como ferrocarriles, carreteras, aeropuertos, edificios, puertos y costas.



Ilustración 5. LIDAR terrestre fijo. / Foto: USGS

3. Representación de la información

a) **Nubes de puntos:** los datasets de puntos espaciales se almacenan comúnmente en formato LAS, que es un formato de archivo binario que almacena la información específica recogida por el LIDAR sin ser, a la par, excesivamente complejo. Los datos LIDAR extraídos de una exploración pueden contener mucha más información que los valores típicos de posicionamiento tridimensional x-y-z, y pueden incluir, entre otros, la intensidad de los retornos láser, la clasificación de los puntos, el número de haces retornados, el tiempo transcurrido y la fuente de cada punto. Esta información también puede venir en forma de archivos de texto; sin embargo, el tamaño de estos archivos puede ser bastante grande (varios millones de registros con muchos caracteres de texto), lo que hace difícil trabajar con ellos.

b) **Modelos Digitales de Elevación (DEM):** Los datos DEM se almacenan generalmente en archivos ráster, con formatos que incluyen GeoTiff (.tif), Esri Grid (.adf), ráster de punto flotante (.flt), o ERDAS Imagine (.img). En algunos casos, los datos están disponibles en formato TIN (por ejemplo, Esri TIN). En los casos rasterizados, se crean utilizando archivos de puntos y pueden ser interpolados utilizando muchas técnicas diferentes. Las técnicas utilizadas para crear un DEM van desde algoritmos de estimación de puntos en cuadrícula de lo más simple (por ejemplo, el vecino más cercano) hasta procedimientos más complejos (por ejemplo, el 'kriging' o regresión) y pueden dar lugar a resultados de superficie ligeramente diferentes. El método de interpolación apropiado depende de los datos y del uso que se desee para el modelo DEM.

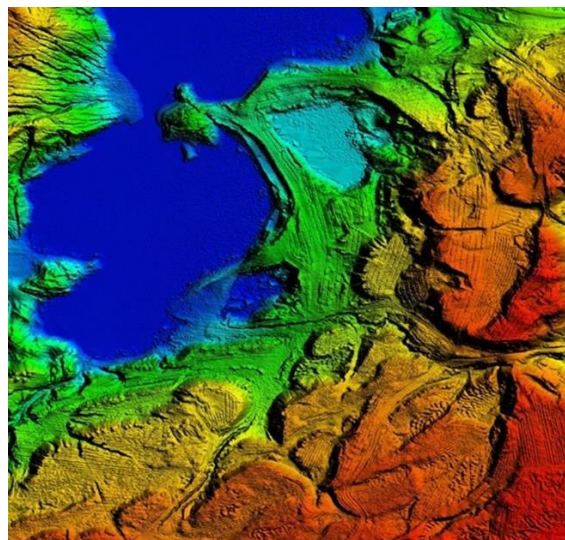


Ilustración 6. Modelo LIDAR DEM. / Foto: Türkiye Gökgez

c) **Hillshading (mapa de sombras del terreno):** es una técnica que ayuda a sacar a la luz pequeñas variaciones en los datos de elevación obtenidos. Su objetivo es imitar el aspecto que tendría el suelo si el Sol brillara sobre él desde un ángulo específico. Este efecto puede ser generado por muchos de los programas normalmente utilizados para trabajar con los datos de distancia y elevación que estamos tratando. La imagen sombreada de la colina resalta la textura de la superficie y revela las imperfecciones del terreno (valles y crestas) que no son evidentes a simple vista. Esta técnica es útil durante las revisiones de calidad del suelo y para la visualización de los datos LIDAR.

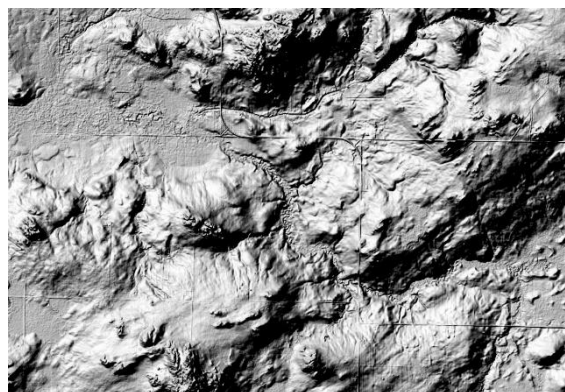


Ilustración 7. Mapa de Hillshading. / Foto: GIS

d) Contornos: los contornos suelen guardarse en formatos vectoriales (por ejemplo, .shp, .dxf) y se derivan con mayor frecuencia de un DEM o TIN preconstruido. Los contornos se encuentran entre las representaciones más utilizadas para los mapas de superficie. Los contornos derivados directamente de los datos del LIDAR son precisos pero no "limpios" y a menudo requieren un nivel de interpolación, simplificación, suavizado o edición manual para generar un producto que pueda ser más fácilmente interpretado por el ojo humano. En el proceso de limpieza y edición de los vectores, la posición de los contornos puede desplazarse ligeramente e incluso pueden eliminarse algunos pequeños rasgos. Este compromiso entre precisión e interpretabilidad es típicamente aceptable ya que los contornos derivados del LIDAR se utilizan más comúnmente para propósitos cartográficos mientras que los DEMs o TINs del LIDAR original se utilizan para propósitos analíticos.

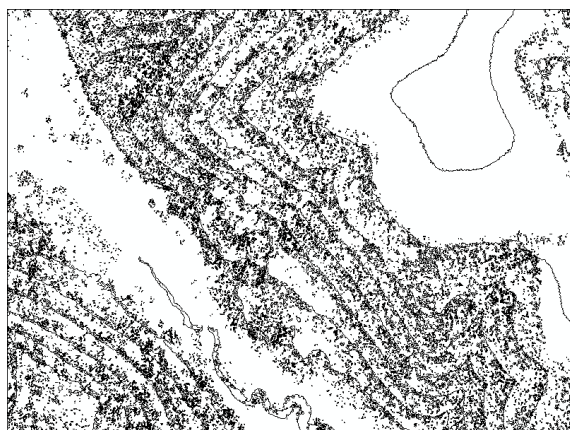


Ilustración 8. Modelo de contornos LIDAR. | Foto: esri.com

IV. Ventajas e inconvenientes de la Tecnología LIDAR

La recopilación de datos en superficie mediante LIDAR tiene varias ventajas sobre la mayoría de las técnicas empleadas en el campo de la cartografía. Esencialmente, los sistemas LIDAR sobresalen en términos de resolución, precisión (en el orden de los centímetros) y exactitud en cuanto a la representación del terreno, incluso en zonas complicadas como los terrenos boscosos. Con las nociones anteriores, podemos resumir en las siguientes las principales ventajas e inconvenientes que por un lado proporciona, y por otro debe combatir, la tecnología LIDAR:

Ventajas del LIDAR:

- a.** Permite recabar datos de alta precisión muy rápidamente, lo que reduce la dependencia humana porque muchos procesos están automatizados.
- b.** Pueden utilizarse independientemente de la hora del día porque se trata de tecnología láser, donde el propio sistema es la fuente de energía lumínica, lo que significa que no se ven afectados por ninguna variación de la luz.
- c.** No se ve afectado por las condiciones meteorológicas extremas, lo que significa que se puede confiar en la técnica en presencia de fenómenos meteorológicos complicados para producir modelos de predicción exactos directamente sobre el terreno.
- d.** Se puede utilizar en ambientes complicados, como bosques densos, e incluso bajo el agua.
- e.** No se ve afectado por ninguna distorsión geométrica, como la inclinación, las pendientes o las compresiones, a diferencia de otros métodos de teledetección.

Inconvenientes del LIDAR:

- a. La calidad de los datos puede verse afectada bajo condiciones meteorológicas especiales, como la lluvia intensa o la niebla, como consecuencia de la refracción de los pulsos de láser.
- b. Puede ser costoso, dependiendo de su campo de aplicación y del tipo de modelo utilizado. El alcance del sistema depende en gran medida de la potencia del láser empleado.
- c. Cuanto mayor es la superficie a estudio, mayor es el volumen de datos que generalmente debe ser recopilado por el LIDAR, lo que significa que requiere una gran capacidad de almacenamiento y poder de computación para proyectar los datos en información utilizable por los expertos. Se demanda a estos sistemas una elevada capacidad de análisis e interpretación que proporcione sentido a los datos recabados.
- d. La precisión de los datos recogidos puede verse afectada por el ángulo solar y los reflejos.

V. Especificaciones de un sensor LIDAR comercial: Velodyne LiDAR Puck (VLP-16)

El Velodyne Puck (VLP-16) es el sensor más compacto de la gama de productos LiDAR 3D de la empresa Velodyne. Desarrollado pensando en la producción en masa, el VLP-16 presume de una serie de características que es preciso destacar: especialmente, la medición de distancias en tres dimensiones y en tiempo real, detección en un ángulo completo de 360°, y reflectividad calibrada.

El VLP-16 tiene un alcance máximo de 100 metros. El bajo consumo de energía del sensor, su peso -sumamente ligero y compacto-, y su capacidad de doble retorno lo hacen ideal no sólo para vehículos autónomos sino también para la robótica y la cartografía terrestre en 3D. El Velodyne Puck de LiDAR soporta 16 canales, con una capacidad de emisión de unos 300.000 puntos por segundo, un campo de visión horizontal de 360° y un campo de visión vertical de 30° ($\pm 15^\circ$ hacia arriba y hacia abajo).

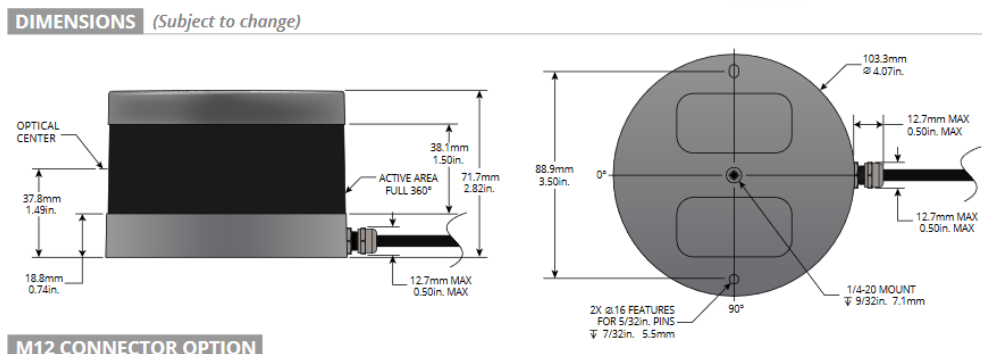


Ilustración 9. Imagen real y datos técnicos del Velodyne Puck VLP-16 / Foto: Velodyne

VI. Aplicaciones actuales de los sensores LIDAR

1. LIDAR en la gestión del medio terrestre y entornos fluviales

Diferentes estudios han demostrado la utilidad de LiDAR en los siguientes campos dentro del ámbito hidrológico-forestal:

1. Mediciones con gran precisión de la altura media de las copas de los árboles
2. Mediciones de áreas basales
3. Mediciones de biomasa
4. Mediciones de volúmenes de madera en zonas boscosas
5. Aplicación de pesticidas
6. Estudio del riesgo de derrumbamientos
7. Modelización de poblaciones de aves
8. Clasificación de los diferentes usos del suelo
9. Gestión de sistemas fluviales
 - Medición de composición y estructura de la vegetación de ribera.
 - Modelización hidrológica y sedimentaria.
 - Análisis de la geomorfología del cauce (medida de la rugosidad, la pendiente, cálculo de la complejidad morfológica...).
 - Análisis de interacciones cauce-sistema fluvial.
 - Análisis de procesos biológicos en el medio fluvial.
 - Estudio de indicadores del estado geológico de los ríos.
 - Estudio de infraestructuras hidráulicas.
 - Obtención de la red de drenaje.

De entre todas las aplicaciones planteadas nos centraremos en aquellas que consideramos más relevantes:

a) Estimación del perfil longitudinal de un río:

El perfil longitudinal del cauce se emplea para analizar su gradiente, así como la potencia hidráulica y transporte sedimentario producido

en el mismo. Este perfil se construye a partir de la medida de elevación del lecho del cauce en sucesivas secciones teniendo como referencia el punto más bajo de cada sección. Dependiendo del nivel de precisión necesario y las características hidromorfológicas del cauce se pueden utilizar diferentes metodologías para la obtención de perfiles. Un perfil longitudinal preciso permite una caracterización con detalle de la morfología del cauce y su rugosidad, la estructura de rápidos y remansos y el conjunto de formas del lecho. Los perfiles longitudinales se pueden obtener con gran precisión gracias al uso de datos LiDAR, reduciendo los elevados costes y homogenizando los resultados. La generación de perfiles longitudinales a partir de los datos LiDAR permite realizar fácilmente adaptaciones de los puntos obtenidos a funciones matemáticas variadas, filtrados y suavizados de la red de puntos, así como el empleo de coordenadas relativas y absolutas de forma conjunta.

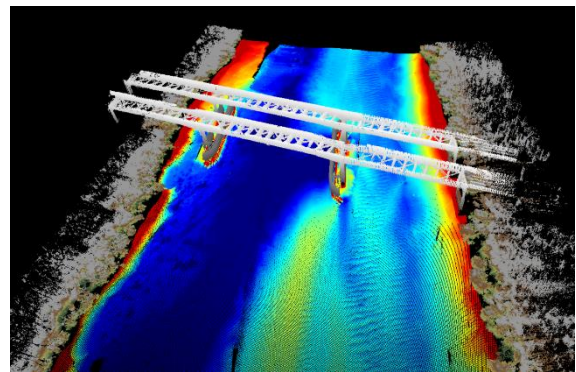


Ilustración 10. Batimetría fluvial combinada con LiDAR.
/ Foto: USGS

b) Análisis de la vegetación de la ribera:

A este respecto, la tecnología LiDAR se emplea en labores de inventario y ordenación forestal, así como en la selvicultura tropical. Se ha abierto posteriormente el camino de la utilización de datos LiDAR en gestión no comercial de bosques (entre ellos los de ribera, donde se estudia la estructura, composición, evolución y funcionamiento de las comunidades vegetales). Además, un sistema LiDAR permite a los expertos analizar qué relación existe entre la vegetación de la ribera

y la del resto de comunidades vegetales. En ciertas ocasiones los datos LiDAR se pueden ver complementados con aplicaciones del láser terrestre, apoyo de vídeo desde plataformas aéreas e inventarios de campo, entre otros. La tecnología LiDAR también se emplea para clasificación de la vegetación de ribera en base a criterios de textura (frecuencia de cambios de tonalidad en la imagen) y altura.

c) Análisis de la microtopografía fluvial:

La microtopografía o microrrelieve de un cauce es un elemento descriptivo tanto de su configuración superficial como de su rugosidad en un rango de escalas milimétricas a métricas. Esta microtopografía del cauce y su entorno tienen una elevada incidencia sobre el ecosistema fluvial dada su relación con la estructura y composición de la vegetación de la ribera. La tecnología LiDAR permite llevar a cabo un análisis efectivo de ecosistemas fluviales, así como estudiar su interacción con los componentes del mismo. Los modelos digitales que se generan en base a los datos LiDAR ofrecen también la posibilidad de analizar la distribución existente de zonas donde se produce acumulación de agua. Gracias a los LiDAR también es posible la realización de estimaciones detalladas de la acumulación de sedimentos en islas y barras a lo largo del cauce, así como de los procesos erosivos que se desarrollan en él.

d) Tramos fluviales urbanos y zonas hidráulicas:

Los modelos digitales obtenidos a partir de los sensores LiDAR ofrecen una gran cantidad de posibilidades para la gestión de tramos urbanos, como la generación de cartografía de inundaciones, combinada con programas de simulación hidráulica. En la actualidad, las simulaciones ofrecen una gran resolución y fiabilidad, lo que permite incrementar la seguridad en cuanto a previsión de derrumbamientos y optimizar la planificación. Además, el uso de tecnología LiDAR sobre plataformas aéreas, combinado con aplicaciones terrestres, permite generar

modelos de gran detalle del alzado y perfil de obras civiles, edificios y demás construcciones.

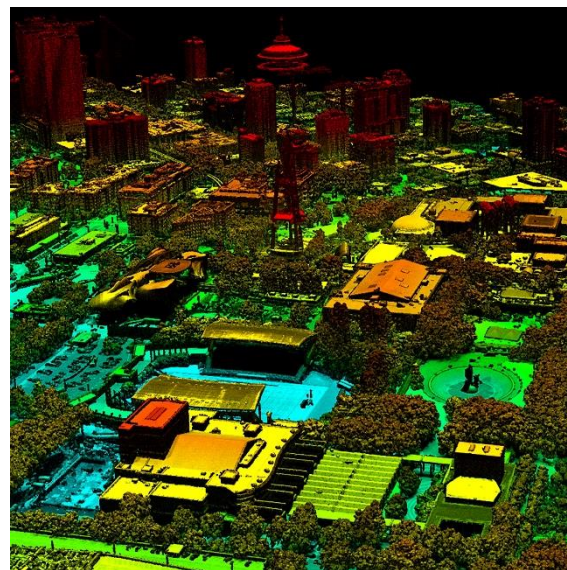


Ilustración 11. Mapeo del terreno con sensores remotos LiDAR | Foto: L3Harris

e) Análisis de cuencas:

Hay muchas aplicaciones para los sensores LiDAR en la gestión de cuencas hidrográficas. Entre ellas, cabe destacar el análisis de procesos erosivos y sedimentarios, los estudios hidrológico-forestales y la investigación de procesos edafológicos, además del análisis general del ciclo hidrológico en cuencas y subcuencas.

1.1. Ventajas e inconvenientes de la aplicación del LIDAR a los entornos naturales

Cabe citar los múltiples efectos positivos que el LiDAR proporciona a la investigación y gestión del entorno natural y, en particular, del medio fluvial:

- Mayor velocidad de realización de análisis gracias al procesado automático.
- Todos los datos se registran numéricamente.
- No requiere de condiciones de radiación solar específicas; ni siquiera requiere la luz del día.
- No es necesario un soporte terrestre, y la recogida de datos es rápida y precisa.

- Proporciona datos en áreas de difícil acceso o con un entorno sensible.
- Los datos recabados son datos digitales aptos para usarse en gran cantidad de paquetes informáticos y que permiten generar muchas vistas diferentes del medio estudiado.
- El volumen de datos generado mediante tecnología LiDAR es bastante más denso que el que se puede obtener con los métodos tradicionales. Además, los datos obtenidos con LiDAR son considerablemente más baratos que aquellos recogidos siguiendo la técnica tradicional.
- Permite cartografiar espacios lineales y estrechos.
- Proporciona mayor facilidad para cartografiar de la superficie terrestre en áreas densamente pobladas, ya que, aunque no todos, sí un buen número de pulsos pueden penetrar en la vegetación y alcanzar la tierra.

No obstante, también se derivan una serie de inconvenientes de la aplicación del LiDAR a la exploración del medio terrestre. Podemos destacar los siguientes:

- Los datos digitales de la superficie terrestre que se pueden obtener con un sensor LiDAR no son perfectos, como sucede con el resto de métodos. La tecnología LiDAR no puede delinear con precisión los límites de las áreas de costa o los cursos de agua, que sí son visibles en imágenes fotográficas. El sistema LiDAR se muestra más capaz que otros métodos para cartografiar superficies cubiertas por vegetación muy densa, si bien cuenta con dificultades en situaciones extremas, dado que los pulsos pueden diseminarse y mostrar variaciones o errores en los registros de superficie captados.
- La mayor parte de los LiDAR emplea radiación cercana al infrarrojo, lo que puede provocar señales de retorno débiles o inexistentes, al ser la longitud de onda correspondiente a la banda del espectro del

infrarrojo absorbida por materiales y superficies como el agua o el asfalto.

- Puede dar lugar a archivos de datos de gran tamaño.

2. LIDAR en la conducción autónoma

El desafío DARPA 2005 inspiró a David Hall, fundador de Velodyne Acoustics, a construir un sensor LIDAR giratorio que pudiera ser montado en la parte superior de un vehículo de competición. Efectivamente, tal vehículo se creó y se puso en funcionamiento, con reseñable éxito. Aunque no logró terminar su primera carrera, la información recogida permitió a su creador perfeccionar el diseño de ese LIDAR giratorio, para incluir poco después en el sistema un conjunto de 64 láseres y sensores que registraban una nube de puntos. Esta nube permitía descubrir de forma artificial aquellos objetos que reflejaban la luz en el área circundante. Su diseño pronto se convirtió en la fuente de negocio de la propia compañía.



Ilustración 12. Sensor LIDAR del coche autónomo de Google. / Foto: Matt McFarland

Los LIDAR giratorios eran caros -alrededor de 50,000 dólares cada unidad- cuando Google comenzó a comprarlos para sus propios experimentos de conducción autónoma. Aunque con el paso de los años fueron abaratándose, aún siguen siendo prohibitivos para el uso común y generalizado dentro de la sociedad actual. En la automoción, es más frecuente encontrar sensores LIDAR que se limitan a 120 grados de un giro de visión completo, si bien se encuentran repartidos por diferentes áreas del vehículo,

generando así un mapa de puntos en tres dimensiones del entorno alcanzable. En 2017, Velodyne Lidar anunció que tenía planes de comercializar una serie de sensores LIDAR compactos con hasta 200 metros de rango por tan solo 250 dólares al por mayor.

2.1. Longitud de onda más larga, mayor alcance.

El objetivo para que la tecnología funcione en este campo, es, según dijo el cofundador de Luminar Technologiess, Jason Eichenholz: “Mayor resolución espacial, menor ángulo entre pulsos, pulsos más estrechos y suficiente energía por pulso para ver con confianza al menos un 10% de los objetos brillantes a 200 metros”.

La compañía comenzó usando longitudes de onda de 905 nm y rápidamente se dio cuenta de que dicha longitud de onda no les permitía alcanzar el rango deseado. La solución de Luminar fue cambiar a la banda de 1550 nm utilizada para telecomunicaciones, y que no llega a la retina del ojo humano, permitiendo mayor potencia de pulso y en consecuencia un rango de 200 metros para objetos oscuros, lo suficientemente lejos para que los automóviles que circulan por la autopista les dé tiempo a detenerse de manera segura si se detecta un peligro.

Eichenholz quería escanear más de un millón de puntos por segundo a 200 metros, pero la luz tarda 1.3 microsegundos en hacer un viaje de ida y vuelta. Para superar este retraso de tiempo y conseguir la cantidad de información puntual deseada, el sistema de Luminar emite dos haces de forma simultánea, cuya interacción es examinada por el detector del sensor. Para escanear la escena, Luminar recurrió a galvanómetros, que en lugar de girar 360 grados, lo hacen en 120° en el plano horizontal y 30° en el vertical, formando un estrecho campo de visión, reduciendo de esta manera la interferencia de la luz solar, los supuestos LIDAR de otros automóviles, faros y otras fuentes de luz.

Entre los diferentes tipos de sensores LiDAR existentes en la actualidad, cabe destacar aquellos que tiene aplicación práctica en el ámbito de la conducción inteligente:

a) LIDAR de ‘Flash’

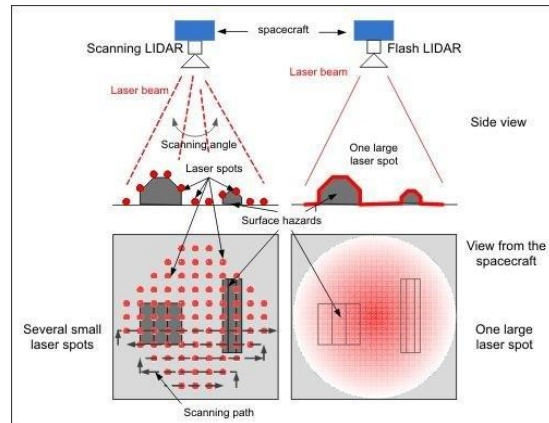


Ilustración 13. Imagen conceptual de un LiDAR de Flash.

El proceso de operación de un LIDAR de ‘Flash’ es muy similar al de una cámara digital estándar, utilizando un flash óptico: un solo pulso láser que ilumina el entorno y una matriz de fotodetectores ubicados cerca del emisor para capturar la luz de vuelta. Un sencillo sistema para el cálculo de distancias, ya que se captura toda la imagen en un solo instante. Por este motivo, este método es más inmune a efectos de vibración que podrían distorsionar la imagen. La gran desventaja de este LIDAR es la existencia de objetos en el mundo real que reflejan la luz muy bien, pudiendo llegar a cegar y por tanto distorsionar la imagen obtenida.

b) LIDAR de onda continua FM

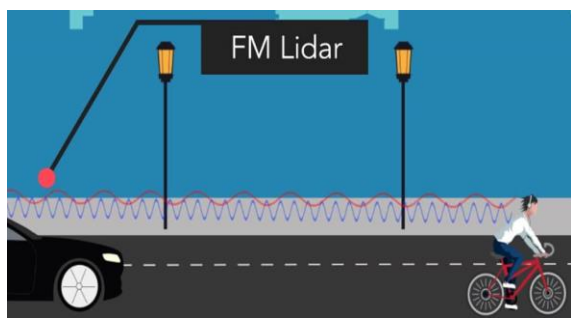


Ilustración 14. Imagen conceptual de un LIDAR de onda continua FM.

Strobe Inc., una empresa nueva en California, EE.UU., que fue comprada en octubre del 2018 por General Motors, propuso una nueva idea. En lugar de disparar pulsos, se emplea un láser de onda continua. Cuando la señal reflejada vuelva al LIDAR, esta será en forma de dientes de sierra. Posteriormente, se mezcla con un haz saliente en un fotodiodo para producir una frecuencia, que se modula y mezcla con un oscilador local haciendo que el sistema sea coherente, y en gran medida inmune a las interferencias. La desventaja de este sistema es el tamaño y los diversos chips que se necesitan. Actualmente, General Motor está investigando para depender del uso de un solo chip permitiendo reducir los costes drásticamente.

2.2. Limitaciones y objetivos a futuro

El objetivo final es reemplazar el LIDAR giratorio por un conjunto LIDAR integrado y compacto, pero potente, y que pueda ser producido en masa con un coste objetivo inferior a los 100 dólares. Se esperan avances al respecto de cara a 2022. Se pretende, además, que los sensores LiDAR integrados en el vehículo formen parte de un conjunto de sensores en constante diálogo con un potente sistema de navegación computarizado para permitir la conducción autónoma integral del vehículo.

No obstante, debemos tener presente que ninguna tecnología puede hacer todo el trabajo de detección necesaria. "No importa cuán bueno sea nuestro sensor LIDAR, si no puede decirte el

color de un semáforo" dice Eichenholz. Por lo tanto, la visión artificial y las cámaras juegan también un importante papel, de acuerdo con los avances proporcionados a este campo por los ingenieros de Tesla.

Asimismo, los sensores LIDAR no pueden proporcionar una alta resolución a muy cortas distancias, aspecto que sería altamente deseable para que los vehículos autónomos se movieran por sitios estrechos. Éste es un trabajo que debe delegarse en los sensores ultrasónicos. Además, cuando la meteorología no acompaña, el rendimiento de los LIDAR puede verse afectado, pudiendo ser menos fiables, si bien este aspecto de los LIDAR se ha mejorado considerablemente con el uso de longitudes de onda superiores.

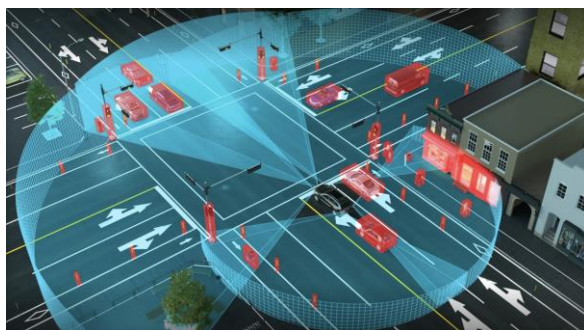


Ilustración 15. Imagen conceptual de un sistema de visión artificial integrado en un vehículo urbano autónomo.

La inteligencia artificial, que promete ser el software troncal del automóvil del futuro, necesitará recoger todas las entradas de estos sensores y juntarlas para crear un único sistema sensorial. Por ahora, como todo en el campo de la autonomía de vehículos, permanece en constante crecimiento y evolución. "Muchas personas y empresas han saltado a este campo y hay mucho dinero en él. Está teniendo lugar una avalancha de nuevas compañías que quieren invertir en la conducción autónoma de vehículos, y zambullirse a este campo, de momento, supone invertir en LIDAR", decía Dennis Killinger, pionero en LIDAR de la Universidad de Sur de Florida.

VII. Referencias

[1] Lidar 101: An Introduction To LIDAR Technology, Data, And Applications - Jamie Carter, Keil Schmid, Kirk Waters, Lindy Betzhold, Brian Hadley, Rebecca Mataosky, and Jennifer Halleran, NOAA Coastal Services Center.

<https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>

[2] An Introduction to LIDAR Technology - Youthmappers.

<https://www.youthmappers.org/single-post/2018/11/27/An-Introduction-to-LIDAR-Technology>

[3] Velodyne LiDAR Puck. Real-Time 3D LiDAR Sensor. http://www.mapix.com/wp-content/uploads/2018/07/63-9229_Rev-H_Puck-Datasheet_Web-1.pdf

[4] Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. Fernando Magdaleno Mas, Roberto Martínez Romero.

<http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/62E92F45-66E3-45C1-A7C1-9C81A22810B4/145992/IngenieriaCivil1422006AplicacionesLiDAR.pdf>

[5] An Introduction to Automotive LIDAR. Texas Instruments.

<http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/62E92F45-66E3-45C1-A7C1-9C81A22810B4/145992/IngenieriaCivil1422006AplicacionesLiDAR.pdf>

[6] LIDAR for self-driving cars. OSA Publishing.

<https://www.osapublishing.org/opn/abstract.cfm?URI=opn-29-1-26>