

ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

# SISTEMA LIDAR

---

CURSO HIDRO-OCEANOGRAFÍA 2019

**TFCDNA Gabriel Medardo GUDIÑO**

**TUTOR: CCCPES Rocío del Valle BORJAS**

**10 DE DICIEMBRE DE 2019**

## INDICE

Índice.....	1
Resumen.....	2
Introducción.....	3
Capítulo 1.....	5
Capítulo 2.....	16
Capítulo 3.....	24
Capítulo 4.....	31
Capítulo 5.....	39
Conclusiones.....	43

## **RESUMEN**

Este trabajo final integrador comprende el desarrollo del sistema LIDAR. Este sistema es uno de los medios más modernos utilizados en la captura de datos para la representación de la superficie terrestre.

El capítulo 1 desarrolla el principio de funcionamiento del elemento principal del sistema LIDAR que es el láser. Describe el funcionamiento de los dos láseres más utilizados en la actualidad y sus ventajas y desventajas respecto de otros equipos.

El capítulo 2 describe el principio de funcionamiento del LIDAR, los elementos que lo componen, su forma de capturar los datos y las características particulares que tiene la captura de esos datos.

El capítulo 3 clasifica los tipos de LIDAR que ofrece el mercado y algunas de sus características.

El capítulo 4 nos habla de los datos LIDAR, sus características y las distintas precisiones que tiene el sistema.

Por último el capítulo 5 explica el principio de funcionamiento del LIDAR batimétrico y las características del agua para su correcto funcionamiento.

La conclusión nos lleva a considerar si la Armada Argentina necesita de éste sistema hoy, o si lo necesitará en el futuro.

## **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo integrador veremos uno de los recursos que se dispone hoy en día para la adquisición de información de la superficie terrestre. El estudio y representación de la corteza terrestre lleva años de evolución, desde los egipcios, quienes tuvieron que encontrar una solución al redelimitado de los terrenos luego de una inundación; hasta hoy en día donde, en un Sistema de Información Geográfica informatizado, tenemos una compilación de información infinita que se puede armar a demanda de las necesidades del usuario.

Ciertas actividades dependen directamente de la representación de información del globo en un plano; y para que éstas sean cometidas satisfactoriamente, esos datos requieren una gran precisión. La determinación de los límites geográficos los países y sus provincias o estados llevó a la creación de redes geodésicas y altimétricas, las cuales permitieron relacionar la topografía al globo terrestre. A su vez la aerofotogrametría ha permitido hacer relevamientos de grandes superficies, la cual amplía el alcance de un trabajo de campo topográfico. Con la llegada del GPS se ha conseguido prescindir, en varios casos, de las estaciones geodésicas, logrando simplificar el relevamiento de datos.

En el ámbito de la Hidrografía, es necesaria la compilación de datos precisos y poder representar esa información en una carta náutica para poder garantizar una navegación segura. En éste caso la topografía, la aerofotogrametría, el GPS y el sondaje de un área es vital para poder ofrecer una carta actualizada, pero éste trabajo demanda gran cantidad de tiempo y medios.

Hoy en día existe un sistema llamado LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) el cual es un dispositivo con un principio de funcionamiento similar a un radar pero con gran precisión. En este trabajo integrador desarrollaremos su principio de funcionamiento, a efectos de poder tener los conceptos claros de éste sistema. Esto nos dará una idea

**ARMADA ARGENTINA  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR**

de la riqueza del LIDAR y lo que éste le puede ofrecer al relevamiento Hidrográfico en nuestro país. Ésta tecnología está utilizándose cada vez en más ámbitos, incluido en los relevamientos hidrográficos de zonas costeras de poca profundidad de varios países, gracias a su precisión y ahorro de tiempo y recursos.

## CAPITULO 1

### TIPOS DE LASER

Para empezar a conocer el funcionamiento del LIDAR empezaremos por su corazón, el cual es el láser. Podemos dividirlos en una clasificación general entre los láseres de gas y los semiconductores. En la página de internet ferrosplanes.com hace un excelente desarrollo del láser de gas que citamos a continuación.

#### 1.1- “EL LASER DE GAS

*Como ya hemos adelantado en la introducción LIDAR es acrónimo de las palabras en inglés de Laser Imaging Detection and Ranging, cuya interpretación en español sería aquel dispositivo que mide distancias hacia un objeto o superficie utilizando un láser.*

*A medida que nos vayamos adentrando en este trabajo iremos aprendiendo su funcionamiento y varias de un sinnúmero de aplicaciones. Pero para llegar a esa instancia primero deberemos aprender que es un láser.*

*LASER es otro acrónimo que traducido al español significa Amplificación de luz por Emisión Estimulada de Radiación; por lo tanto es un dispositivo que produce y amplifica la luz de forma casi imposible de obtener por cualquier otro medio. Previo a la descripción de funcionamiento debemos entender como emite luz un átomo.*

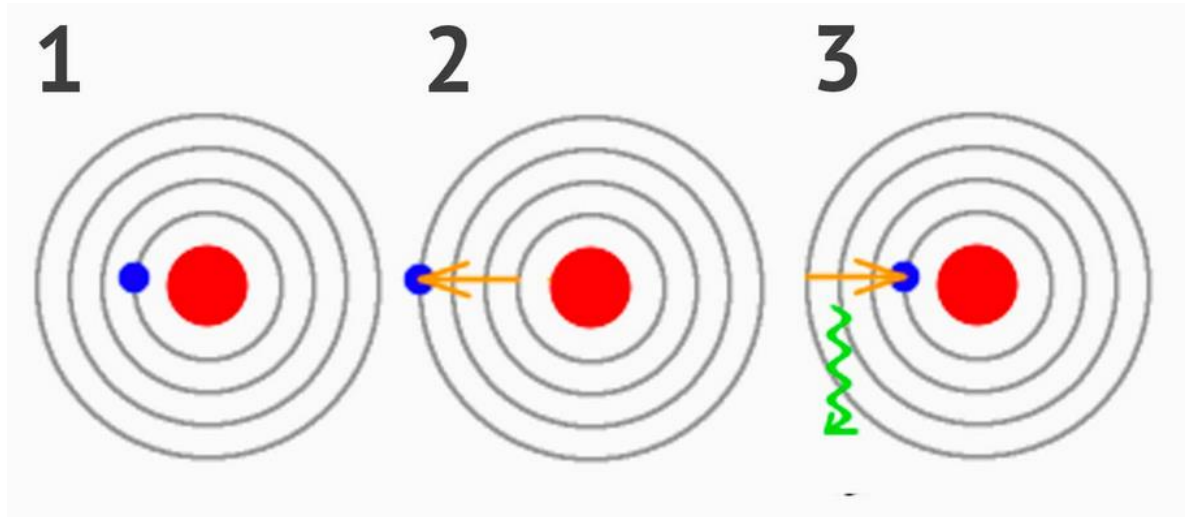


FIGURA 1. EMISIÓN DE LUZ DE UN ÁTOMO. FUENTE: [www.explainthatstuff.com](http://www.explainthatstuff.com)

*La mayor parte de la masa del átomo se concentra en su núcleo, el cual está formado por protones y neutrones agrupados. A su vez, los electrones están dispuestos alrededor del núcleo en capas u órbitas. Cuando más energía tiene un electrón más alejado del núcleo esta.*

*Los átomos emiten luz en un proceso de tres pasos:*

- *Empiezan en su estado fundamental, con los electrones en su lugar normal.*
- *Cuando absorben energía, uno o más electrones son expulsados fuera del núcleo, mas lejos de él, a niveles de energía más elevados. Punto en el que se dice que el átomo se "excita".*
- *Sin embargo, un átomo excitado es inestable e intenta volver a su estado estable y fundamental, de manera que emite el exceso de energía que originalmente obtuvo como fotón de energía (onda verde ondulada): un paquete de luz.*

*Un láser sigue este proceso a gran escala: es una máquina que hace que miles de millones de átomos bombardeen billones de fotones a la vez, de modo que se alinean para formar un haz de luz concentrado.*

### 1.1.1- COMPONENTES

Un láser de gas tiene 3 partes básicas:

- Una carga de átomos (sólido, líquido o gaseoso) con electrones a estimular alrededor del núcleo. Esto se conoce como el **medio laser** o, a veces, el medio de amplificación o “ganancia”.
- Algo con lo que estimular los átomos, como un tubo de flash u otro laser. Esto se denomina **sistema de bombeo**.
- Una **cavidad óptica**.

### 1.1.2- FUNCIONAMIENTO

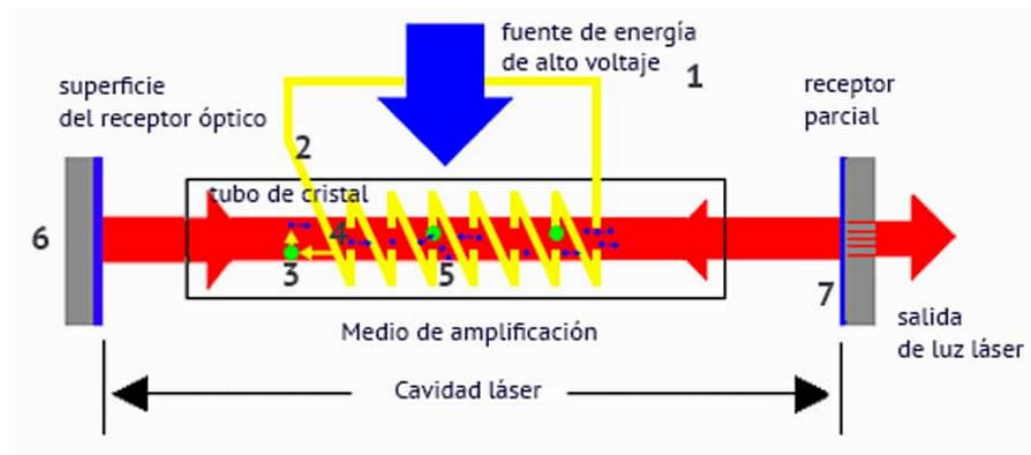


FIGURA 2. ESQUEMA DEL LÁSER. FUENTE: [www.ferrosplanes.com](http://www.ferrosplanes.com)

En ésta imagen podemos apreciar un esquema del láser, cuyo funcionamiento se desempeña de la siguiente manera:

1. Un suministro de alto voltaje hace que el tubo de flash (como el de la lámpara de xenón) se encienda y apague intermitentemente.
2. Cada vez que el tubo parpadea, “bombea” energía al cristal de rubí. Los flashes hacen que se inyecte energía en el cristal de rubí en forma de fotones.



3. *Los átomos en el cristal, absorben esta energía en un proceso llamado absorción. Los átomos absorben energía cuando sus electrones saltan a un nivel de energía más alto. Después de unos milisegundos, los electrones vuelven a su nivel de energía original (estado fundamental) emitiendo un fotón de luz. Este fenómeno se llama **Emisión Espontanea**.*
4. *Los fotones emitidos por los átomos se acercan y se alejan dentro del cristal de rubí, viajando a la velocidad de la luz.*
5. *En algunos momentos, uno de los fotones estimula un átomo ya excitado. Cuando esto sucede, el átomo excitado emite un fotón y recuperamos nuestro fotón original. Este otro fenómeno se llama **Emisión Estimulada**. En este momento, un fotón de luz ha producido dos fotones de luz, así que ésta se ha amplificado. En otras palabras, la “amplificación de luz” ha sido causada por “emisión estimulada de radiación”.*
6. *Un espejo parcial en el extremo del tubo hace rebotar algunos fotones en el cristal, pero deja escapar algunos.*
7. *Los fotones que escapan forman un haz muy concentrado de luz láser muy potente.”<sup>i</sup>*

## 1.2.- LASER SEMICONDUCTOR

A partir de lo que desarrolla la Universidad Autónoma Metropolitana a continuación entenderemos el funcionamiento de este otro tipo de laser:

*“Los materiales semiconductores son aquellos que a temperaturas muy bajas se comportan como aislantes, es decir, no conducen la electricidad, pero que cuando la temperatura aumenta por encima de un cierto valor se convierten en muy buenos conductores.*

El esquema de nivel de energía para un semiconductor ideal se muestra en la figura a continuación, el espectro de nivel de energía consiste en varias bandas anchas, estas son las bandas de valencia V y la banda de conducción C, separadas por una región prohibida de energías (gap), cada banda consiste de una gran número de estados de energía muy cercanos unos de otros.

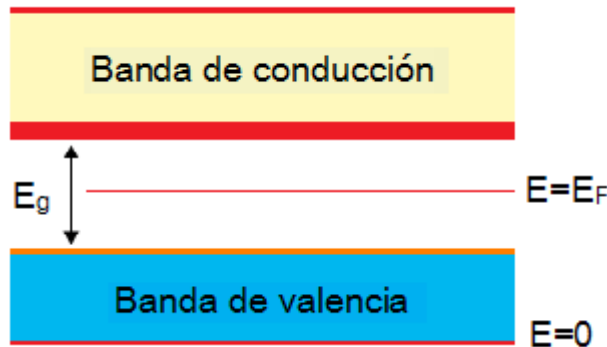


FIGURA 3. BANDAS EN SEMICONDUCTORES. FUENTE: *Universidad Autónoma Metropolitana*

Cuando aumenta la temperatura o se hace incidir luz sobre estos materiales, los electrones de la banda de valencia adquieren energía suficiente para saltar a la banda de conducción, dejando un hueco en la primera.

Para mejorar aún más la conducción en los materiales semiconductores, se les introducen impurezas, átomos similares que pueden tener un electrón menos (tipo p) o un electrón más (tipo n). Este proceso se denomina dopaje. La conductividad eléctrica del semiconductor se aumenta sustancialmente si se le añaden impurezas de cualquiera de los dos tipos en partes por millón.

Una consecuencia importante es que en semiconductores con impurezas el número de electrones que conducen electricidad puede ser controlado. Las propiedades de conductividad de la unión p-n dependen de la dirección del voltaje, de manera que así se puede controlar el uso del dispositivo. En la figura siguiente vemos gráficamente las bandas de conducción y de valencia para materiales semiconductores tipo n y tipo p.

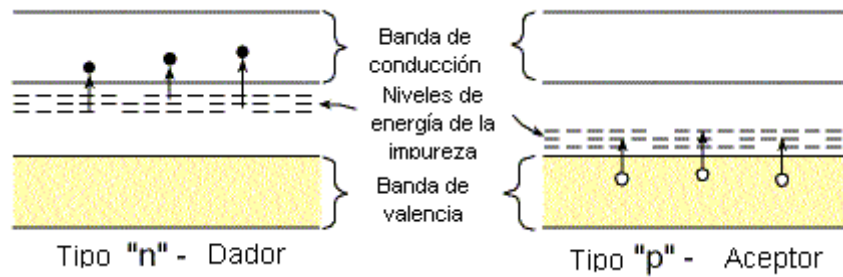


FIGURA 4. BANDAS EN SEMICONDUCTORES. FUENTE: Universidad Autónoma Metropolitana

Quando un semiconductor tipo "p" se asocia a un semiconductor tipo "n", tenemos una: Unión p-n.

Esta unión conduce la electricidad en una dirección preferencial (polarizado hacia adelante). Este aumento direccional de la conductividad es el mecanismo habitual para todos los diodos y los transistores en electrónica.

En la figura siguiente se visualizan las bandas de energía de una unión p-n ideal cuando no se aplica ningún voltaje externo. Esta disposición de las bandas en la unión, es la base de la acción del láser diodo.

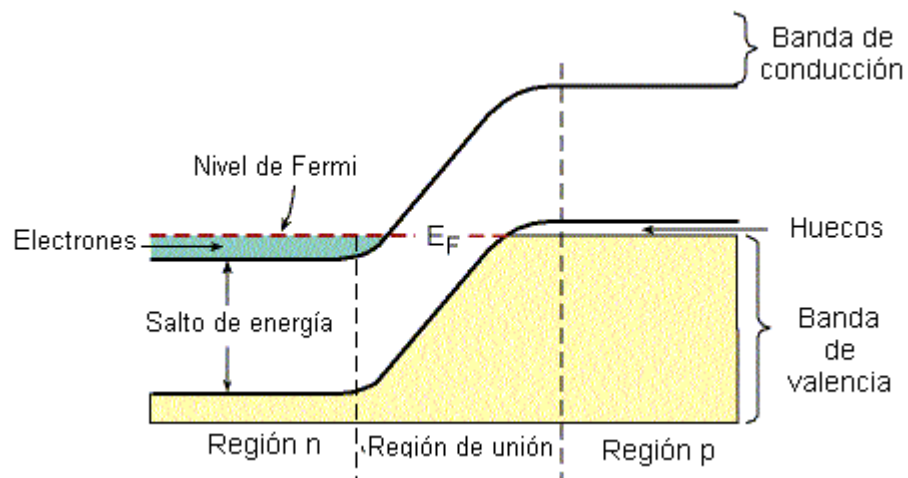


FIGURA 5. BANDAS DE ENERGÍA. FUENTE: Universidad Autónoma Metropolitana

El nivel de máxima energía ocupado por electrones se denomina nivel de Fermi. Cuando el contacto positivo de la fuente de voltaje se une a la parte p de la unión p-n, y el contacto negativo se conecta a la parte n, la corriente fluye a través de la unión p-n. Esta conexión se denomina Voltaje polarizado hacia adelante.

Cuando se conecta la polaridad inversa, esta conexión es llamada Voltaje de polarización posterior, y esto provoca un aumento del potencial de barrera entre la parte p y la parte n. Ello dificulta el flujo de corriente a través de la unión p-n.

Cuando se aplica un voltaje sobre la unión p-n, cambia la población de las bandas de energía. Puede aplicarse el voltaje a la unión en dos configuraciones posibles:

Voltaje polarizado hacia adelante - significa que el polo negativo de la fuente de voltaje está conectado a la parte "n" de la unión, y la parte positiva está conectada al semiconductor tipo "p", como se muestra en la siguiente figura.

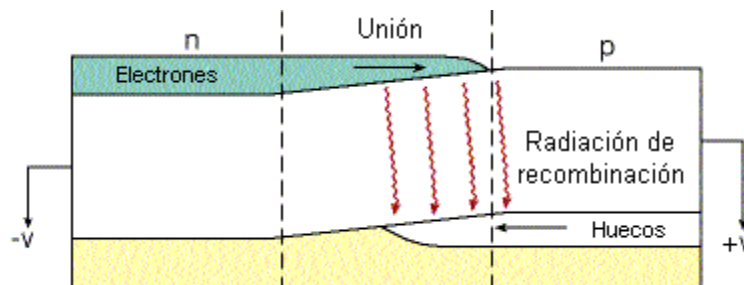


FIGURA 6. POLARIZACIÓN. FUENTE: Universidad Autónoma Metropolitana

El voltaje polarizado hacia adelante genera portadores de carga extra en la unión, disminuye el potencial de barrera, y provoca la inyección de los portadores de la carga, a través de la unión, hasta otro sitio.

Cuando un electrón de la parte "n" de la banda de conducción, es inyectado a través de la unión a un hueco vacío de la banda de valencia en la parte "p", se produce un proceso de recombinación (de un electrón más un hueco). Como resultado del proceso de recombinación, se libera energía.

Para los láseres de diodo interesan los casos específicos en los que esta energía se libera en forma de radiación láser. Se produce un aumento sostenido de la conductividad cuando el voltaje polarizado hacia adelante es aproximadamente igual a la separación de energía del semiconductor.

Voltaje Inverso (hacia atrás) - el cual provoca un aumento del potencial de barrera de la unión, y disminuye la posibilidad de que un electrón cruce la unión hasta otro lado. Aumentando el voltaje inverso hasta valores elevados (decenas de voltios), puede producirse una ruptura del voltaje de la unión (avalancha).

### 1.2.1.- RADIACIÓN DE SALIDA DE UN LÁSER DE DIODO

La figura describe la forma de la radiación electromagnética láser de un láser simple de diodo construido en capas.

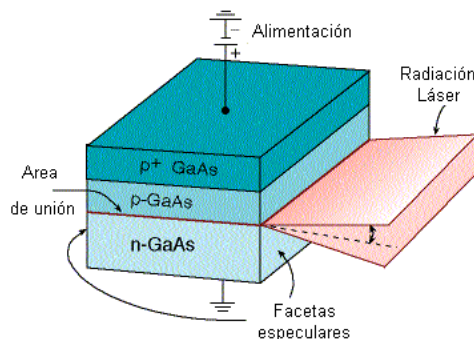


FIGURA 7. RADIACIÓN E.M. LÁSER. FUENTE: Universidad Autónoma Metropolitana

*La radiación proviene de la forma rectangular de una capa muy delgada, y se dispersa con diferentes ángulos en 2 direcciones.*

*Después se describirán las estructuras especiales que permiten confinar la capa activa a una pequeña región, y controlar la forma del perfil de la radiación láser.*

*La aniquilación de un par electrón hueco con emisión de un fotón puede implicar o no, en función de la estructura de bandas del material que forman la unión p – n, la emisión simultánea de un fotón. Si se da dicha emisión de un fotón se dice que sucede transición indirecta o, en caso contrario, una transición directa.*

*La recombinación con emisión espontánea es muy efectiva en semiconductores con transiciones directas, como GaAs, pues en ellos la vida media de emisión espontánea es muy corta ( $10^{-10} - 10^{-9} s$ ) y, por tanto, la amplificación que se obtiene en un sistema con inversión de población como este es muy alta. Por el contrario, en un semiconductor de transiciones indirectas, como Si o Ge, la emisión espontánea tiene una vida media relativa muy alta ( $10^{-5} s$ ) y predomina el efecto de los procesos no radiactivos, de modo que no es posible obtener un láser a partir de este tipo de semiconductores.”<sup>ii</sup>*

#### **1.4.1.- VENTAJAS DE LOS LASERES DE DIODO**

Gracias al Folleto de la empresa CorDEX vemos a continuación los principios básicos de funcionamiento y hacemos una comparación con el ultrasonido:

- *“Rendimiento muy alto (más del 20% de la energía suministrada es emitida como radiación láser).*

- *Alta fiabilidad.*
- *Tiempo de vida muy largo.*
- *Precio muy barato - Los láseres de diodo se fabrican utilizando técnicas de producción a gran escala utilizadas en la industria electrónica.*
- *Posibilidad de realizar la modulación directa de la radiación emitida, controlando la corriente eléctrica a través de la unión p-n. La radiación emitida es función lineal de la corriente y puede llegar a una velocidad de modulación de decenas de GHz.*
- *Pequeño peso y volumen.*
- *Corriente umbral muy baja.*
- *Bajo consumo de energía.*
- *Bandas espectrales estrechas, las cuales pueden ser de unos pocos Khz. en láseres de diodo especiales.*

#### **1.4.2.- MEDICIÓN DE DISTANCIAS CON LÁSER**

*Una vez desarrollado y comprendido como opera el elemento principal de un LIDAR analizaremos a continuación cómo se mide distancias un sistema de radar básico.*

#### **1.4.3.- PRINCIPIOS BÁSICOS**

*El principio de funcionamiento de una medición de distancia laser consiste en emitir un pulso de luz enfocado a un blanco y detectar el reflejo. El sistema mide el tiempo entre éstos dos eventos y lo convierte en una distancia. La fórmula es simple:  $Distancia = \frac{1}{2} (velocidad \times tiempo)$ .*

*Un medidor de distancias ultrasónico trabaja con un principio similar, pero en lugar de la luz usa el sonido en una frecuencia muy alta para ser detectada por el oído humano. La velocidad del sonido es*

*aproximadamente 300 m/s, por lo tanto la medición es más fácil, pero hay otros asuntos, los cuales veremos abajo.*

#### 1.4.4.- LASER VS ULTRASONIDO

*A simple vista, el ultrasonido tiene varias de las muchas ventajas que posee una medición laser. De igual forma, el ultrasonido es menos preciso, ya que el sonido es por lejos mucho más difícil de enfocar que la luz láser. La precisión es normalmente de unos varios centímetros. Además, en algunas condiciones, la precisión puede ser aún más pobre que los valores “típicos”.*

*El ultrasonido necesita una superficie suave, plana y grande como blanco, ésta es su gran limitación. Además la señal se dispersa en un cono desde el medidor hasta el objeto, provocando muchos rebotes y por lo tanto interferencias.”<sup>iii</sup>*

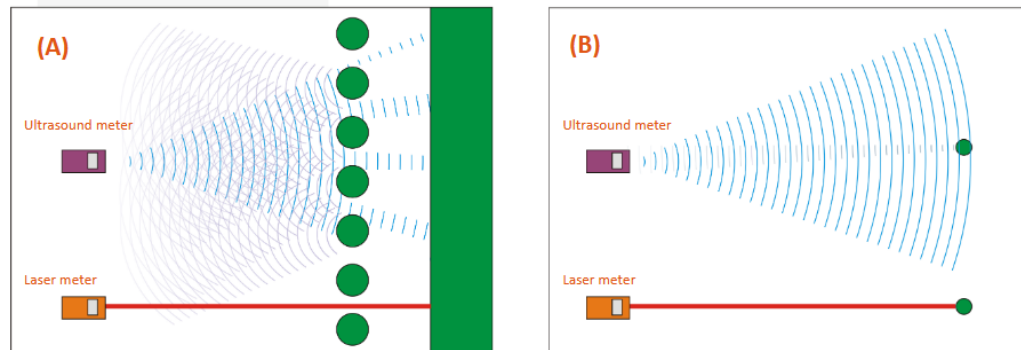


FIGURA 8. LASER VERSUS ULTRASONIDO. FUENTE: CorDEX Instruments.



## CAPITULO 2

### LIDAR

El LIDAR es un sensor remoto activo. Esto significa que el sistema envía un pulso de luz y espera que éste regrese. Este es diferente a los sensores pasivos, que recogen la energía reflejada del Sol o a otros sensores activos que utilizan ondas de radio.

El principio de funcionamiento es el siguiente:

- Emite un pulso láser sobre una superficie
- Captura el láser reflejado de nuevo a la fuente
- Mide el tiempo que el láser viajó
- Calcula la distancia ( $D=(C*t)/2$ )

Este proceso se repite más de un millón de veces y termina produciendo un mapa complejo del área encuestada: una nube de puntos 3D.

#### 2.1.- COMPOSICIÓN DEL LIDAR COMO SISTEMA

El Ingeniero Mariano García ALONSO hizo una evaluación del uso de la tecnología LIDAR en la estimación del contenido del carbono forestal de donde obtuvimos la siguiente información:

*“La tecnología que maneja este sistema funciona muy rápido, ya que es capaz de calcular la distancia entre los sensores LIDAR y el objetivo más de un millón de veces. Los sistemas LIDAR están integrados por 3 componentes principales si se utilizan en plataformas como ser aeronaves, drones u otro tipo de vehículo:*

- *ESCANER LASER: Los sistemas LIDAR emiten una luz láser desde varios sistemas móviles (automóviles, aviones, drones, etc...) a través del aire y la vegetación (láser aéreo) e incluso agua (láser batimétrico). El escáner está recibiendo la luz de fondo (ecos), midiendo distancias y ángulos. La velocidad del escaneado influye en el número de puntos y ecos medidos por un sistema LIDAR. La elección de la óptica y el escáner influyen enormemente en la resolución y el rango en que se puede operar el sistema.*
- *SISTEMAS DE NAVEGACIÓN Y POSICIONAMIENTO: Si el sensor se monta en un avión, auto o drone, es crucial determinar la posición y la orientación del sensor para asegurarse que los datos capturados son datos utilizables. Los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) proporcionan información geográfica precisa sobre la posición del sensor (latitud, longitud, altura) y la unidad de medición inercial (IMU) define en este lugar la orientación precisa del sensor (pitch, roll, yaw). Los datos registrados por éstos 2 dispositivos se utilizan para generar datos en puntos estáticos: la base de la nube de puntos de mapeo 3D.*
- *TECNOLOGÍA INFORMÁTICA: Con el fin de aprovechar al máximo los datos el cómputo es necesario para que el sistema LIDAR funcione definiendo una posición de eco precisa. Se requiere para la visualización de datos en vuelo o el post-procesamiento de datos, así como para aumentar la precisión entregada en la nube de datos 3D.*

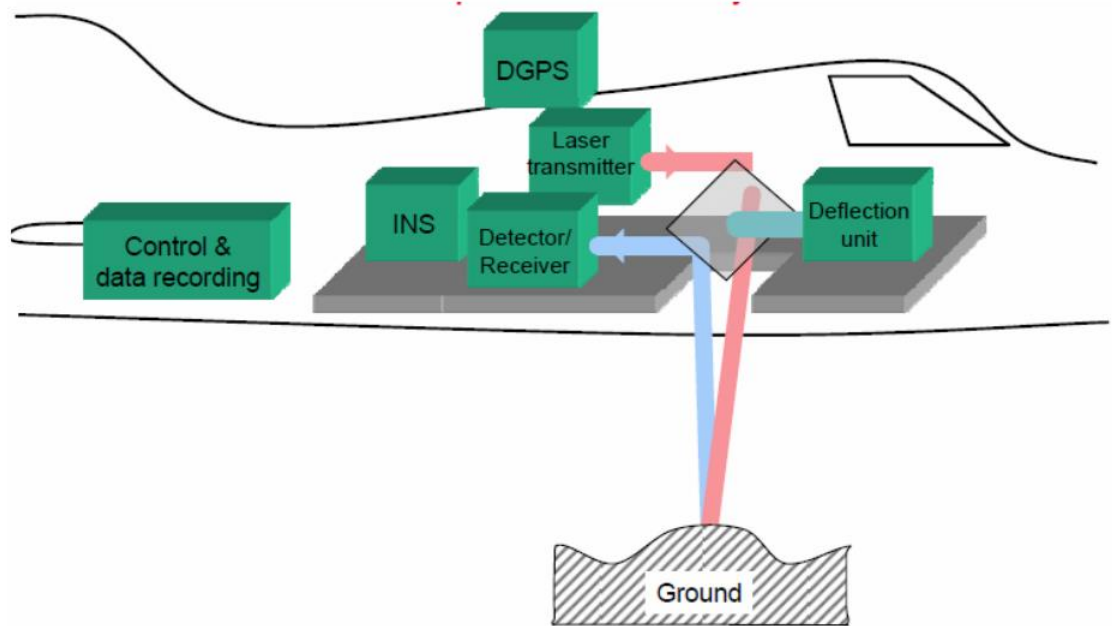


FIGURA 7. COMPONENTES DE UN SISTEMA LIDAR. FUENTE: *Universidad de Ancará*

## 2.2.- ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

*Los sistemas LIDAR han evolucionado a una velocidad vertiginosa los últimos años, impulsado por la competencia comercial pero también por el potencial mostrado por esta tecnología en distintos ámbitos de aplicación. Por lo tanto, a la hora de planificar la adquisición de datos, es fundamental tener en cuenta las especificaciones de los sistemas disponibles puesto que en muchos casos estas especificaciones determinarán los costes de adquisición e incluso la viabilidad del proyecto. Las principales especificaciones operacionales son:*

### - MECANISMOS DE ESCANEEO

*En la imagen a continuación veremos algunos de los mecanismos más utilizados para la detección de datos LIDAR.*

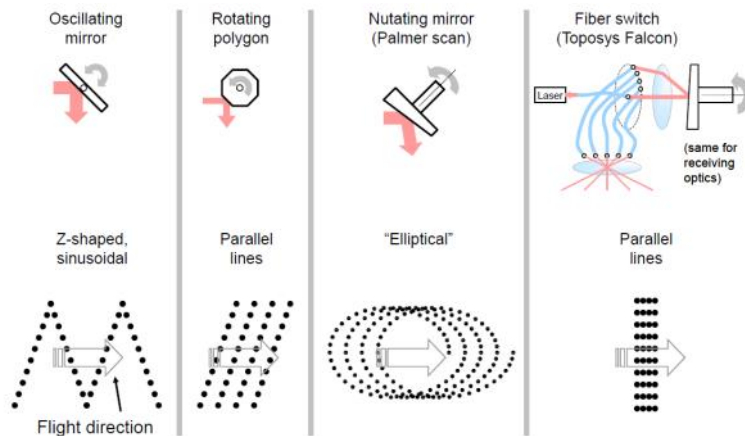


FIGURA 8. MECANISMOS DE ESCANEO. FUENTE: *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

- **ESPEJO OSCILANTE:** *El espejo no gira completamente en torno al eje, sino que oscila de ida y de vuelta por la aceleración y desaceleración. Los espejos oscilantes crean un patrón de lectura sinusoidal, como se muestra en el primer cuarto de la figura. Tiene la particularidad de tener mayor densidad de puntos en los extremos del barrido, y menor en el centro.*

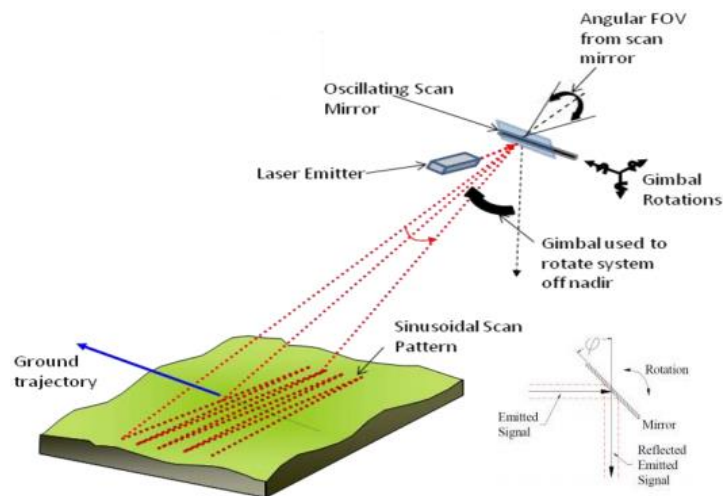


FIGURA 9. ESPEJO OSCILANTE. FUENTE: *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

- *POLIGONO DE ROTACIÓN: Otro mecanismo de barrido es el polígono de rotación, el cual consiste en un espejo multifacético de prisma, que gira continuamente alrededor de un eje de rotación. Las caras del polígono junto con su rotación, dirigen la energía hacia la superficie. Al igual que el sistema oscilante, esto generalmente se utiliza para barrer perpendicularmente a la trayectoria del LIDAR. Como en la transferencia de la energía laser de una cara del polígono a otra hay un salto discontinuo y repentino del lado opuesto de la exploración, resulta en un patrón de lectura que consiste en una serie de líneas de exploración casi paralelas.*

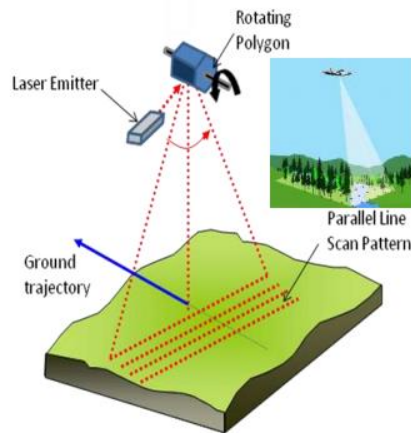


FIGURA 10. POLÍGONO DE ROTACIÓN. FUENTE: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- *ESPEJO DE NUTACIÓN: Este método consiste en un espejo oscilante que se inclina en referencia a la luz desde el emisor láser. La rotación de este espejo crea un patrón de lectura elíptica en la superficie, y el movimiento hacia adelante del sensor crea una cobertura en la dirección a lo largo de la trayectoria. Una desventaja de éste método es que las mediciones no son relativamente uniformes, teniendo una concentración grande de puntos en los bordes de la faja de escaneo, acrecentándose esto por el hecho de que las misiones de escaneo consisten generalmente en muchas fajas con solapes entre ellas.*

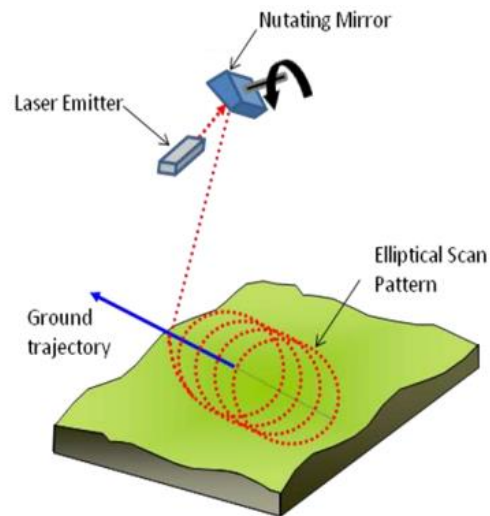


FIGURA 11. ESPEJO DE NUTACIÓN. FUENTE: *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

- **PUNTAS DE FIBRA:** En este sistema la luz láser se dirige a la superficie por un haz de fibras de vidrio, y la dirección de exploración de un pulso dado depende del canal de fibra que se emite. Un sistema similar de haces de fibra se utilizan en la óptica del receptor.

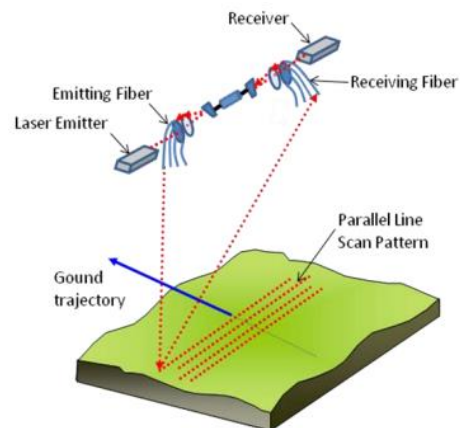


FIGURA 12. PUNTAS DE FIBRA. FUENTE: *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

- **FRECUENCIA DE EMISIÓN DE PULSOS:**

*Representa el número de pulsos emitidos por segundo. Los sistemas actuales pueden operar a frecuencias superiores a 150 khz, lo que hace que puedan generar nubes de puntos mucho más densas. Esto permite que los vuelos se realicen a mayor altura y velocidad, reduciendo, por lo tanto, el tiempo de vuelo y la velocidad del mismo.*

**- FRECUENCIA DE ESCANEEO:**

*Hace referencia al número de líneas de escaneo (o patrones) por segundo.*

**- DIVERGENCIA DEL RAYO:**

*Se refiere a la desviación de los fotones de la línea de propagación teórica del rayo, de manera que a medida que aumenta la distancia el diámetro del rayo aumenta. Normalmente la divergencia del rayo oscila entre 0.1 y 1 mrad, lo que significa que para una divergencia de 0.3 mrad, a una distancia de 1000 metros el diámetro será de 30 cms. Como consecuencia de este incremento del área como consecuencia de la divergencia del rayo, para una misma distancia y una misma cantidad de energía emitida, cuanto mayor sea la divergencia se tendrá una menor razón señal-ruido.*

**- ÁNGULO DE ESCANEEO:**

*Se refiere al ángulo con el que el pulso es emitido perpendicularmente a la línea de vuelo y determina el ángulo de visión (Field of View – FOV)*

**- DIÁMETRO DE LA HUELLA:**

*Es el diámetro del rayo interceptor por un plano situado a una distancia determinada del emisor. El valor del diámetro es en función de la altura de vuelo y de la divergencia del rayo. En el caso de superficies horizontales y rayos emitidos nadiralmente la huella tendrá una forma circular, mientras que para superficies inclinadas o rayos emitidos con un*

*determinado ángulo se obtendrá un eclipse, por lo que el tamaño de la huella será en función de los ejes mayor y menor de la elipse. Este parámetro es similar a la revolución espacial (tamaño del pixel) de una imagen tomada por un sensor óptico pasivo, puesto que determina el área de muestreo.*

**- LONGITUD DE PULSO:**

*Es la duración de la emisión del pulso, normalmente medida en nanosegundos (nS). Junto con la configuración del sistema de detección de pulsos, determina la resolución en distancia o mínima distancia entre dos retornos consecutivos de un pulso en los sistemas discretos.*

**- DISTANCIA ENTRE HUELLAS:**

*Es la distancia nominal entre los centros de dos rayos consecutivos a lo largo de la línea de vuelo y entre dos líneas de vuelo. Es en función de la frecuencia de escaneo, la altura de vuelo y la velocidad del avión. Determina junto con el tamaño de la huella la resolución espacial de un sistema LIDAR.*

**- CONFIGURACIÓN DE REGISTRO:**

*Este término hace referencia al modo en el que se registra la energía devuelta hacia el sensor. Estos parámetros son específicos de cada sistema utilizando algoritmos propietarios de cada fabricante, y determinan la mínima energía necesaria para que se registre el retorno. Junto con la longitud del pulso, determinan la mínima distancia entre dos retornos consecutivos. Algunos sistemas graban hasta 6 retornos por cada pulso emitido. Estos sistemas se denominan sistemas discretos. Otros sistemas son capaces de registrar la energía de manera prácticamente continua y se denominan sistemas de huella continua.”<sup>iv</sup>*



### CAPITULO 3

#### CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS LIDAR

En los próximos dos capítulos veremos lo que nos dice el Ingeniero Mariano García Alonso en su evaluación, pudiendo apreciar lo que nos ofrece el sistema LIDAR:

*“Los avances que ha experimentado la tecnología LIDAR, así como la diversidad creciente de campos de aplicación donde esta tecnología ha mostrado un gran potencial, ha dado lugar al desarrollo de diversos sistemas, con distintas configuraciones y características. Los distintos sistemas existentes pueden agruparse en distintas categorías atendiendo a diversos criterios:*

- **SUPERFICIE A MEDIR:** *Un primer criterio clasifica los sensores en función del tipo de superficie a medir, considerando sensores topográficos, sensores batimétricos y sensores atmosféricos. Los primeros suelen operar en la región del infrarrojo cercano (700-1300 nm) mientras que los empleados para aplicaciones batimétricas o atmosféricas se emplean sistemas que trabajan dos longitudes de onda, una en el infrarrojo cercano y otra en la región verde (500-600 nm). Algunos sensores incluyen también longitudes de onda en el infrarrojo medio de onda corta-SWIR (1550 nm). La mayoría de los sistemas aerotransportados comerciales trabajan en longitudes de onda correspondientes al infrarrojo cercano.*

Fabricante	Modelo	Longitud de onda (nm)
<b>Fugro</b>	FLI-MAP 400	1,500
<b>IGI</b>	LiteMapper 5600	1,550
<b>IGI</b>	LiteMapper 2400	905
<b>LeicaGeosystems</b>	ALS50-II	1,064
<b>Optech</b>	ALTM Gemini	1,060
<b>Riegl LMS</b>	LMS-Q240i-60	900
<b>Riegl LMS</b>	LMS-Q240i-80	900
<b>Riegl LMS</b>	LMS-S560-I	1,500

TABLA 1. LONGITUDES DE ONDA DE DIVERSOS EQUIPOS LIDAR. FUENTE: *Universidad de Ancará*

- **PRINCIPIO DE MEDIDA DE DISTANCIAS:** Podemos considerar dos grupos en función del método empleado para determinar el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso y su retorno. El primer método, más directo, consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión del pulso hasta su recepción mediante relojes ultra precisos, y es empleado por la mayoría de los sistemas comerciales. El segundo se basa en determinar la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido. En este caso el tiempo empleado por el pulso en recorrer la distancia sensor-objeto es directamente proporcional a la diferencia de fase observada.

- **PLATAFORMA:** Un tercer criterio para clasificar los sistemas LIDAR es en base a la plataforma sobre la que va instalado el sensor. Así por ejemplo, podemos encontrar sistemas terrestres, sistemas aerotransportados y sistemas a bordo de satélite. Más recientemente se han desarrollado sistemas montados sobre vehículos denominados sistemas LIDAR móviles (VLS). Estos sistemas son una variación de los sistemas terrestres, montados sobre vehículos, vagones o furgonetas, lo que les proporciona mayor flexibilidad.



FIGURA 13. LIDAR TERRESTRE. FUENTE: Universidad de Ancará.

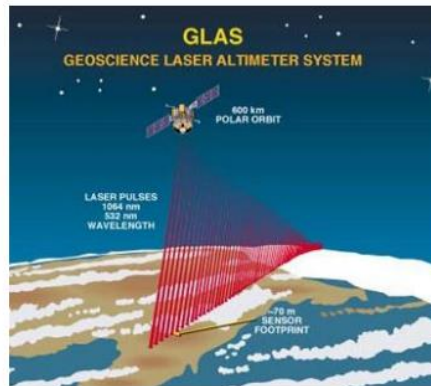


FIGURA 13. LIDAR SATELITAL. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

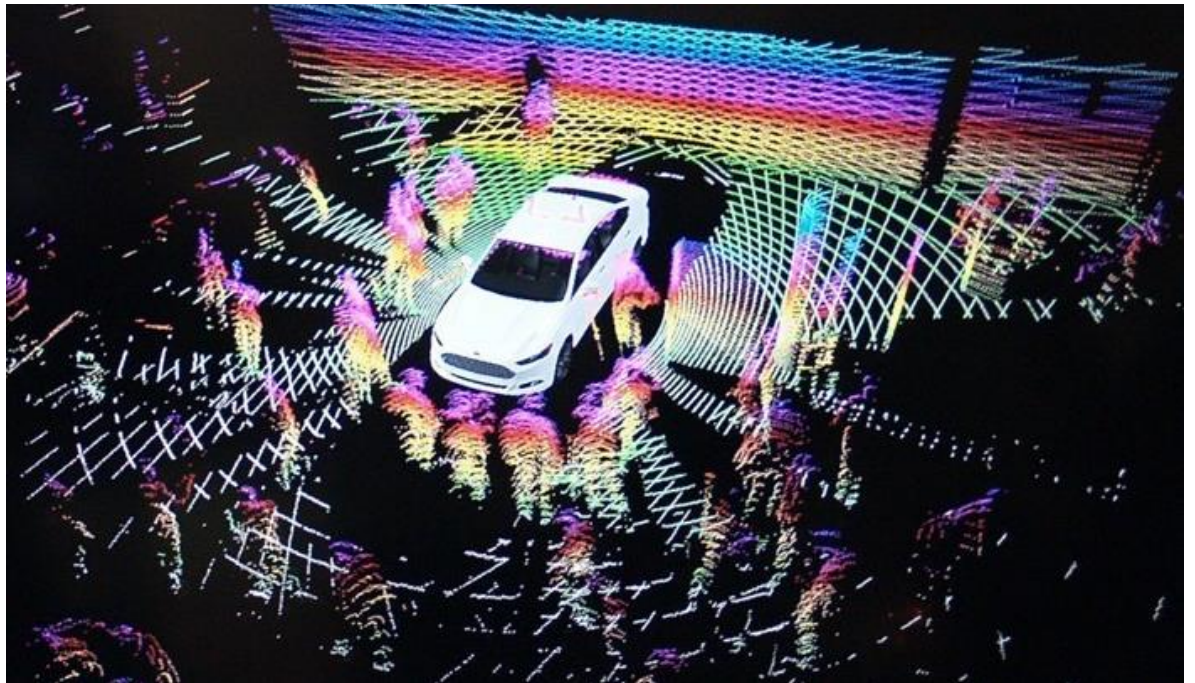


FIGURA 14. LIDAR TERRESTRE MÓVIL. FUENTE: *www.atthelights.com*

- **CAPACIDAD DE REGISTRO:** Siguiendo este criterio, podemos clasificar los sistemas en sensores discretos y sensores de huella continua.

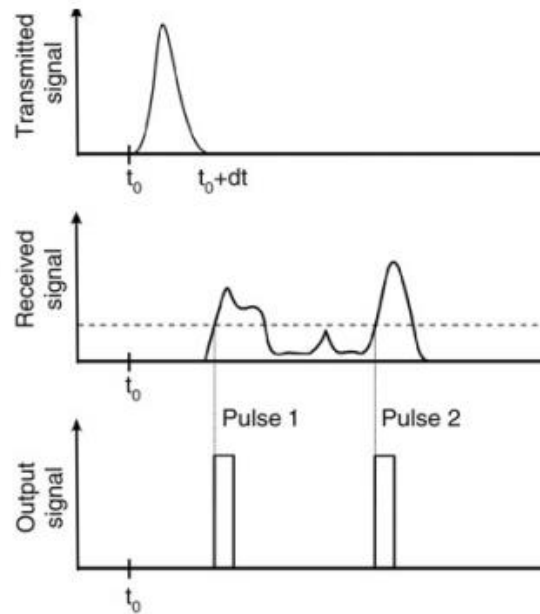


FIGURA 15. SENSORES DISCRETOS. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

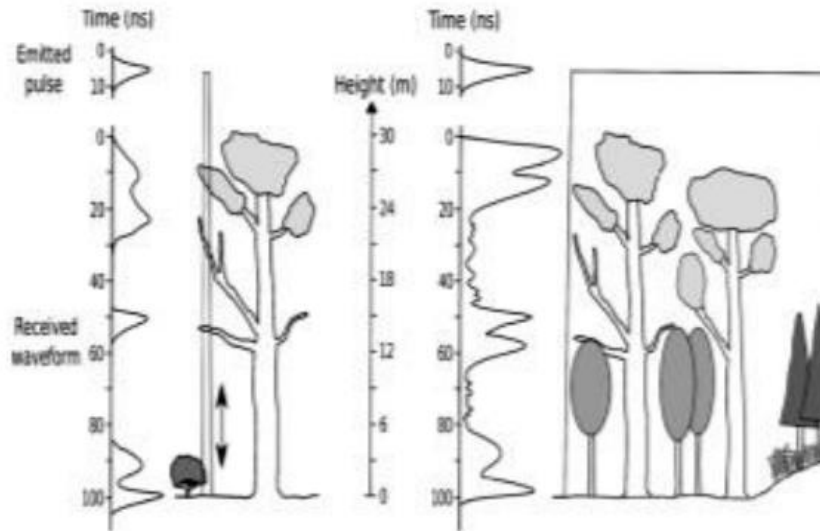


FIGURA 16. SENSORES DE HUELLA CONTINUA. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

*“El primer grupo graba retornos discretos por cada pulso emitido, en cambio el segundo grupo de sensores digitalizan toda la energía que es devuelta hacia el sensor por los distintos objetos situados en el camino óptico del pulso emitido ofreciéndonos diversos retornos.*”

*Imaginemos que estamos en un bosque. Y en el podemos apreciar como ingresa la luz solar. Esto significa que el LIDAR puede pasar a través de la vegetación. Además, esto significa que el LIDAR puede alcanzar la superficie terrestre, o la vegetación de menor altura. Una cantidad significativa de energía del LIDAR puede penetrar un bosque como lo hace la luz solar.*

*Pero el LIDAR no reflejará simplemente en el suelo. En un área con vegetación puede reflejar diferentes partes de ella hasta que el pulso finalmente alcance el suelo; usar el LIDAR para alcanzar los puntos terrestres descubiertos no significa que estoy haciendo una radiografía a la vegetación. En realidad estamos penetrando a través de los espacios que dejan las hojas y ramas. El LIDAR recolecta una enorme cantidad de puntos.*

*Los múltiples rebotes en las ramas nos dan la cantidad de retornos.*

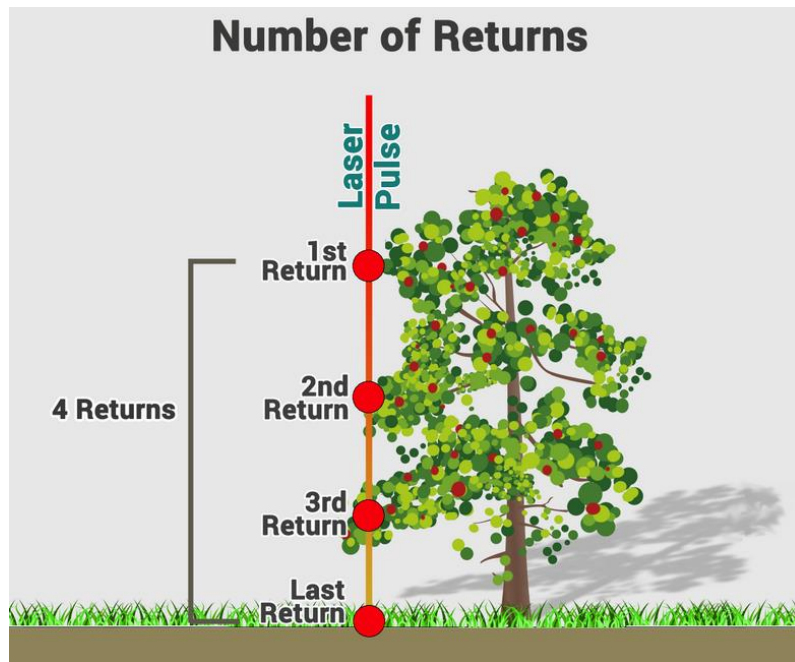


FIGURA 17. NÚMEROS DE RETORNOS. FUENTE: GIS Geography.

*Al descender el pulso del láser en la vegetación vamos obteniendo diferentes retornos hasta que la señal alcanza el suelo. Si no hay un bosque en el medio solo tendremos el retorno del suelo. Es decir que, a veces, el pulso no solo refleja una cosa. En el caso de los árboles un pulso puede tener varios retornos, el sistema LIDAR permite grabar toda esta información empezando desde el tope del follaje hasta el suelo. Esto permite al sistema interpretar estructuras y formas.”<sup>v</sup>*

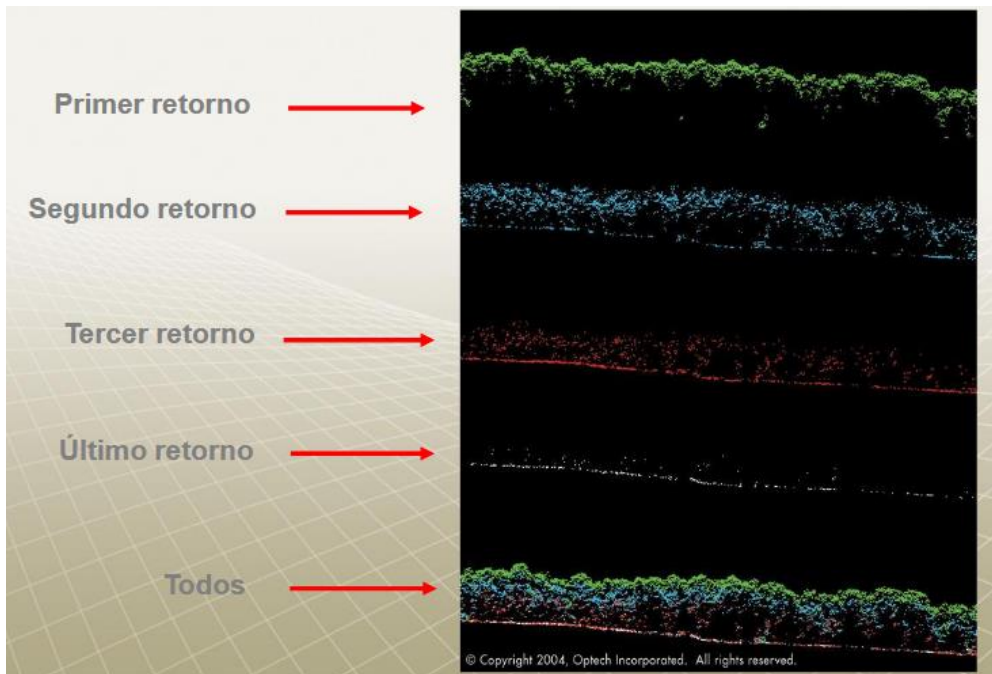


FIGURA 18. RETORNOS LIDAR. FUENTE: *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

- **“TAMAÑO DE LA HUELLA:** *De acuerdo al tamaño de la huella, podemos clasificar los sensores como sistemas de huella pequeña (varios centímetros), y sistemas de huella grande (hasta varios metros). El tamaño de la huella es un parámetro crítico que determina el área de muestreo sobre el terreno o lo que es lo mismo la proyección sobre el terreno del campo instantáneo de visión (Instantaneous Field of View – IFOV) del sensor, esto es, la resolución.”<sup>vi</sup>*

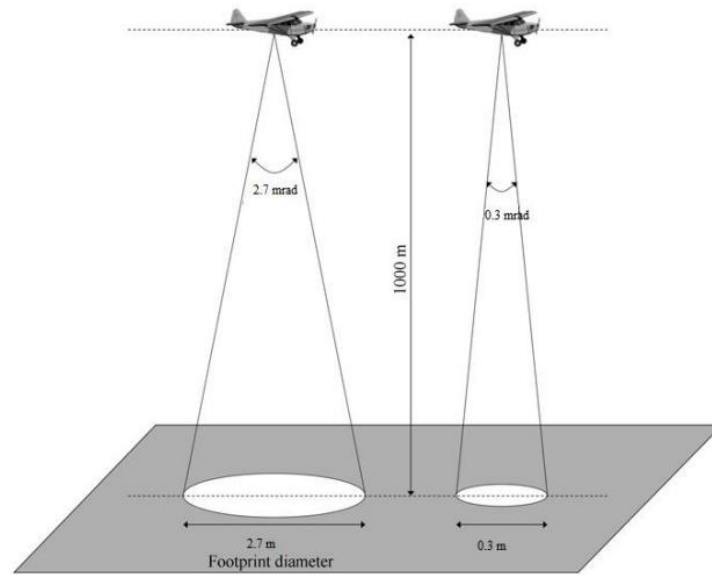


FIGURA 19. SENSORES DE HUELLA CONTINUA. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

## CAPÍTULO 4

### 4.1.- DATOS PROPORCIONADOS POR LOS SISTEMAS LIDAR

En este apartado nos centraremos en los sistemas LIDAR aerotransportados discretos, por ser ampliamente los más utilizados. *“En este caso, los sistemas registran coordenadas (X, Y, Z), es decir la posición de los objetos sobre los que incide el pulso láser emitido. Además de las coordenadas del punto donde se refleja el pulso láser emitido, los sistemas LIDAR registran la intensidad de cada uno de los retornos, lo cual representa la cantidad de energía reflejada.*

*La energía recibida depende de las propiedades del sistema LIDAR, el ángulo de incidencia, la reflectividad del objeto sobre el que incide el pulso, la absorción atmosférica y la distancia sensor-objeto. También depende de otros factores relacionados directamente con el sistema empleado como por ejemplo el factor de ganancia del receptor o incluso fluctuaciones en la energía emitida por el sensor. El factor de ganancia determina la sensibilidad del sensor a la radiación que le lleva. Este factor es variable en función de las características de reflectividad del área que se esté escaneando. Así por ejemplo, cuando se sobrevuelan zonas con elevada reflectividad se reduce la sensibilidad del sistema para evitar que se sature, mientras que cuando se sobrevuelan zonas con baja reflectividad se modifica el factor de ganancia para aumentar la sensibilidad del sistema.*

*Como consecuencia de distintos factores que afectan la intensidad, ésta pudo variar entre distintas adquisiciones, regiones o incluso a lo largo de la misma línea de vuelo. Por lo tanto, de cara a comparar los valores de intensidad entre distintos sensores, líneas de vuelo o campañas de adquisición, la intensidad debe corregirse de efectos atmosféricos, el efecto de la distancia, la energía del pulso y el ángulo de incidencia si la campaña de adquisición ha incluido varios ángulos de campo de visión, o frecuencias de emisión de pulsos. La mayoría de los sistemas comerciales registran pulsos discretos y no proporcionan información sobre los algoritmos empleados para detectar los pulsos, de manera que la*



*intensidad puede corresponder a la intensidad máxima registrada en un intervalo de tiempo o la integral de la energía registrada en dicho intervalo.*

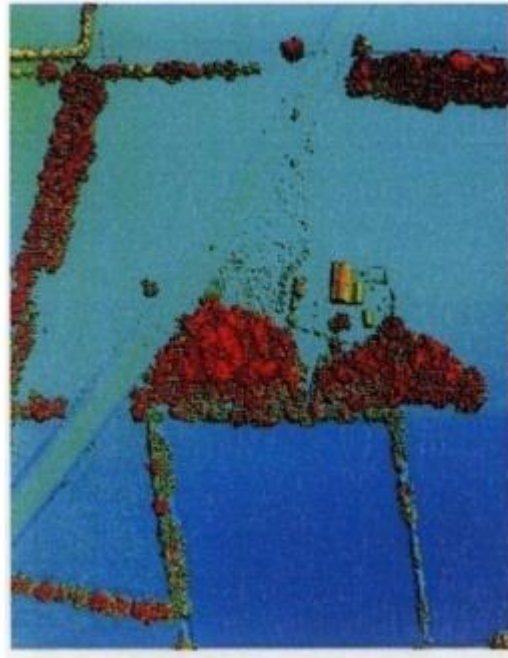


FIGURA 20. IMAGEN FORMADA A PARTIR DE DATOS DE ALTURA. FUENTE: *Universidad de Ancará.*



FIGURA 21. IMAGEN FORMADA A PARTIR DE DATOS DE INTENSIDAD. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

#### **4.2.- ATRIBUTOS DE LOS DATOS LIDAR**

*En el caso de los aerotransportados discretos, el resultado de un vuelo LIDAR es una nube de puntos donde para cada punto se tiene las coordenadas de los puntos donde el rayo láser ha incidido sobre los objetos situados sobre la superficie terrestre, la intensidad del retorno, así como otra serie de atributos relativos al pulso emitido como el ángulo de escaneo, la distancia sensor-objeto, o el número de retorno correspondiente. Así mismo, el conjunto de datos queda definido por una serie de atributos que describiremos a continuación. No todos los conjuntos de datos incluyen los parámetros descriptos.*

- **DENSIDAD DE PULSOS:** *Determina el número de pulsos emitido por cada metro cuadrado y es la función de la distancia de las huellas ( $d=1/\text{dist. Huellas}^2$ ). Este atributo está relacionado con la resolución espacial.*

- **DENSIDAD DE PUNTOS:** *Hace referencia al número de retornos por metro cuadrado. Sólo en el caso de obtener retornos únicos éste valor coincidirá con el anterior. En el caso de superficies donde es posible obtener varios retornos para cada pulso emitido, la densidad de puntos puede ser mucho más alta que la densidad de pulsos. Por esta razón, a la hora de planificar un vuelo se debe especificar un número mínimo de pulsos por metro cuadrado y no de puntos por metro cuadrado.*

- **NÚMERO DE RETORNO:** *Especifica el orden de un retorno en relación a aquellos que se han generado a partir de un pulso.*

- **ÁNGULO DE ESCANEO:** *Indica el ángulo con el que se emitió el pulso. Por lo tanto, este atributo corresponde al pulso emitido y que es heredado por los retornos asociados al pulso.*

- **TIEMPO GPS:** Indica el tiempo en el que se emitió el pulso. Este atributo corresponde al pulso emitido y que es heredado por los retornos asociados al pulso.

- **FINAL DE LA LINEA DE ESCANEEO:** Es un atributo binario que indica si el pulso corresponde al final de una línea de escaneo. Este atributo corresponde al pulso emitido y que es heredado por los retornos asociados al pulso.

- **CLASIFICACIÓN:** Indica la clase a la que corresponde el retorno. Esta información dependerá de que los datos hayan sido clasificados anteriormente.

#### **4.3.- FORMATO DE LOS DATOS LIDAR**

En los inicios de esta tecnología cada fabricante desarrolló un formato de almacenamiento de los datos que en muchas ocasiones no tenían en cuenta las opciones de importación/exportación a otros formatos, lo que dificultaba el intercambio de datos. En muchas ocasiones, los datos se ofrecían en formato ASCII ofreciendo las coordenadas X, Y, Z e intensidad de cada retorno en una línea distinta. Este formato se caracteriza por la facilidad de acceso con distintos editores de textos. Sin embargo, desde el punto de vista de almacenamiento de datos, éste no es un formato eficiente pues los archivos suelen tener un tamaño 2 a 3 veces superior al que tendrían los mismos datos almacenados en formato binario. Además el acceso a los datos es mucho más lento.

En los últimos tiempos se ha aprobado y generalizado un formato para los datos LIDAR aprobado por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Este formato se denomina LAS y contiene:

- **CABECERA:** Especifica información como la identificación del tipo de archivo, información genérica sobre el proyecto, la versión del formato

*LAS utilizada, fecha de creación, el número de puntos almacenado en el archivo, factores de escala y sesgo de las coordenadas de cada punto registrado, etc.*

- **REGISTROS DE LONGITUD VARIABLE:** *Contiene información relacionada con la proyección, los metadatos o información del usuario.*

- **INFORMACIÓN DE LOS PUNTOS DATOS:** *Contiene las coordenadas, intensidad, número de retorno, número de retornos por pulso, ángulo de escaneo o incluso la categoría a la que se ha asignado cada punto. La siguiente figura muestra las categorías en que puede clasificarse un retorno:*

<b>Classification Value (bits 0:4)</b>	<b>Meaning</b>
0	Created, never classified
1	Unclassified <sup>1</sup>
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Model Key-point (mass point)
9	Water
10	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>
11	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>
12	Overlap Points <sup>2</sup>
13-31	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>

TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE RETORNOS. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

#### **4.3.- PRECISIÓN DE LOS DATOS LIDAR**

*A pesar de que los sistemas LIDAR son capaces de determinar las coordenadas de los puntos de reflexión con mucha precisión, existen varias fuentes de error que afectan a la precisión con la que se determina la posición de los puntos. En términos generales estas fuentes de error se pueden agrupar en:*

- *Errores de alienación entre el láser, el avión y el sistema de navegación, que causarán errores sistemáticos en los datos.*
- *Precisión en la determinación de la distancia. Este error se propaga principalmente en la coordenada Z.*
- *Error del espejo, causado principalmente por problemas mecánicos (vibraciones y oscilaciones), y se transmite en mayor medida a las coordenadas planimétricas.*
- *Errores del sistema GPS/INS. Puede considerarse como la mayor fuente de error, causando errores en las coordenadas finales comprendidos entre los 10 y 20 centímetros en altitud y hasta 50 centímetros en X e Y.*

*El efecto de estos errores queda reflejado como desplazamientos en las áreas de solape de las pasadas adyacentes o transversales, en términos relativos, o respecto a superficies de control, en términos absolutos. Tradicionalmente se ha prestado mayor atención a los desplazamientos altimétricos puesto que la precisión de la determinación de la altura es el factor más importante en la generación de MDT. Sin embargo, el uso de modelos 3D en un número cada vez mayor de aplicaciones ha resaltado la necesidad de determinar las discrepancias tanto altimétricas como planimétricas. Para determinar la precisión relativa de los datos, se evalúan los datos correspondientes a las zonas de solape entre pasadas. Para determinar la precisión absoluta es necesario realizar una campaña de campo y medir elementos que sirvan posteriormente de referencia.*

*Normalmente las precisiones dadas por los proveedores de datos son +/- 15 cm. para la coordenada Z y +/- 50 cm. para las coordenadas X e Y para una altura de vuelo de 1.000 mts. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estas precisiones suelen referirse a superficies de control sobre terreno plano y considerando superficies sólidas como por ejemplo una pista de aterrizaje, campos de fútbol o áreas de similares características en las proximidades de la zona de vuelo.*

*En el caso de superficies forestales, además de los errores anteriores, que podemos considerar como errores propios del sistema*

*deben tenerse en cuenta otros factores como por ejemplo la frecuencia de escaneo, la configuración de discretización para identificar retornos, la divergencia del rayo o el ángulo de escaneo. Estos factores afectarán a la proporción de retornos correspondientes al suelo, así como a la precisión de las coordenadas que se midan.*

*Todos los errores descritos se propagarán a las variables que se vayan a estimar posteriormente a partir de los datos LIDAR, por lo que es necesario un control de calidad de los mismos.”<sup>vii</sup>*

#### **4.4.- IMÁGENES 3D DE OBTENCIÓN DE DATOS LIDAR**

##### **NUBES DE PUNTOS**

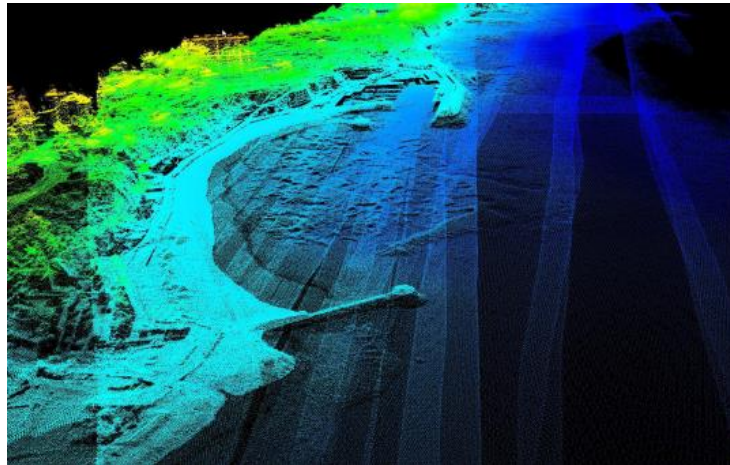


FIGURA 22. NUBE DE PUNTOS EN VILLAJYOYOSA. FUENTE: *Luis Moreno Blasco.*

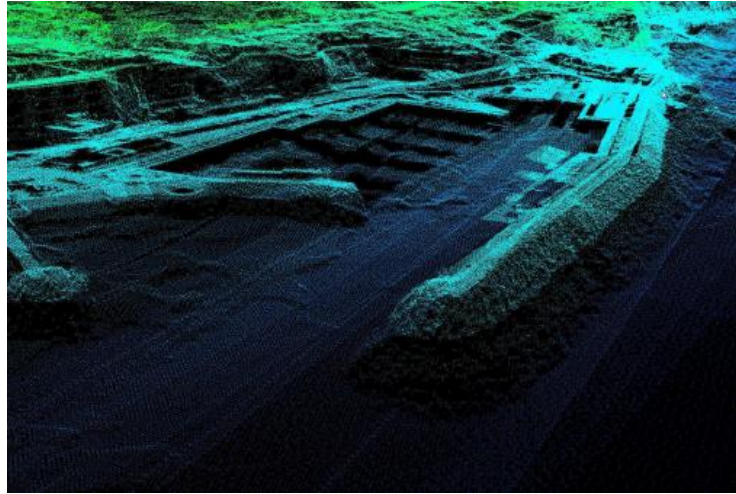


FIGURA 23. NUBE DE PUNTOS EN VILLAJOYOSA. FUENTE: *Luis Moreno Blasco*.

## COMPARACIÓN DE DENSIDAD DE SONDEOS

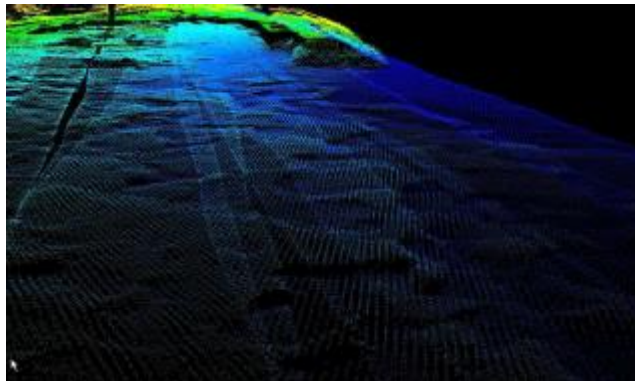


FIGURA 24. NUBE DE PUNTOS. DENSIDAD 2x2 MTS. FUENTE: *Luis Moreno Blasco*.

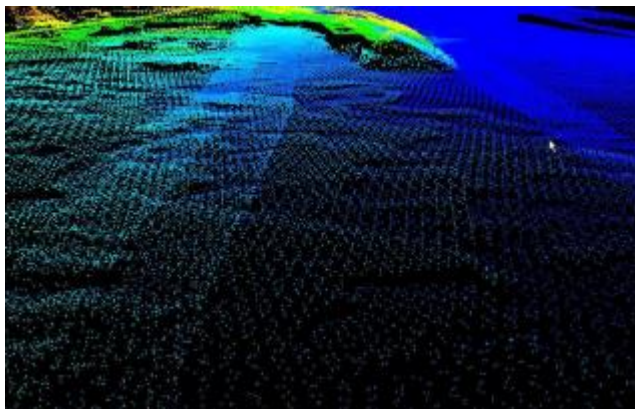


FIGURA 25. NUBE DE PUNTOS. DENSIDAD 5x5 MTS. FUENTE: *Luis Moreno Blasco*.

## CAPITULO 5

### LIDAR BATIMÉTRICO

Para entender el funcionamiento del LIDAR Batimétrico primero tendremos que entender ciertas características del agua, hecho perfectamente resuelto en el libro “Métodos en Oceanografía Física” que a continuación transcribo:

*“El agua, en grandes cantidades, es un líquido de color azul. Esto es debido a que su absorción en esta zona del espectro es muy débil, mientras que por encima de 500 nm y hasta aproximadamente 750 nm la absorción de la luz es cada vez más significativa. Es importante observar que es la forma de esta curva la que determina en mayor medida el color del agua en las zonas oceánicas, ya que la contribución del material particulado vivo o no vivo es significativamente mayor en estas regiones. Así, los mayores valores de absorción hacia 650-700 nm implican que estas longitudes de onda son selectivamente absorbidas en los primeros metros del océano, penetrando el azul a mucha mayor profundidad y determinando el color real.*

*Los valores de absorción del agua pura en la zona de azul son en realidad tan débiles que resultan difícil de medir, y los valores que figuran en la literatura son bastantes diversos. A pesar de ello, son significativos para los organismos fotosintéticos, en el sentido de que evitan parte de las radiaciones ultravioletas que tienen importantes efectos de inhibición en la fotosíntesis. A longitudes de onda superiores a 1.000 nm existen zonas de absorción aún más intensas que las detalladas en la figura a continuación.”<sup>viii</sup>*



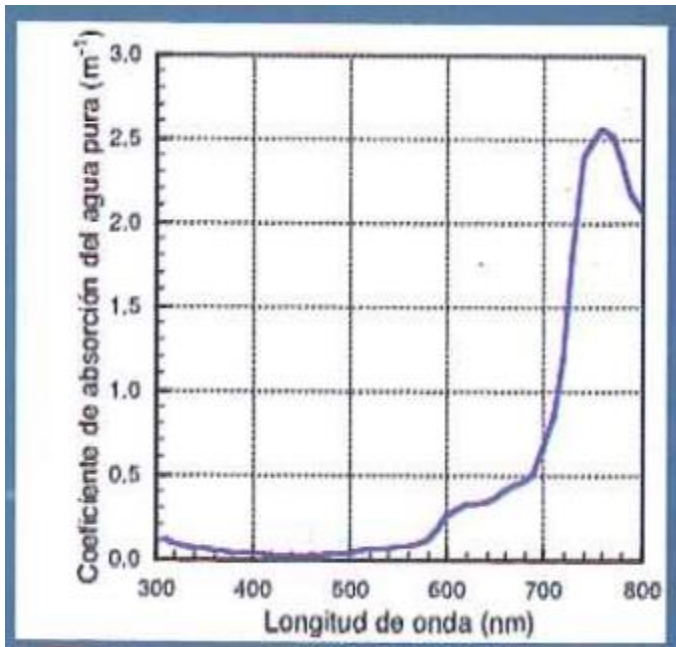


FIGURA 26. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA.  
FUENTE: *Métodos en Oceanografía Física*.

Entendido esto podemos comprender el funcionamiento del LIDAR batimétrico también conocido como SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey). La principal diferencia con los sistemas topográficos es que el sistema SHOALS utiliza 2 variables, entiéndase, 2 rayos láser. La diferencia entre estos 2 láseres radica en las longitudes de onda, en las que en cada uno son diferentes. La mayoría de los LIDAR topográficos utilizan rayos infrarrojos que se reflejan en la mayoría de los objetos. El sistema SHOALS utiliza un láser en una longitud de onda en infrarrojos, que es reflejada por la superficie del agua y terrestre, y el láser de longitud de onda azul-verde (500 nm) para penetrar en la superficie del agua y se refleja desde el fondo.

La distancia capaz de penetrar el rayo azul-verde dependerá de las características del medio, llegando a alcanzar profundidades de aproximadamente 50 mts. en las mejores condiciones.

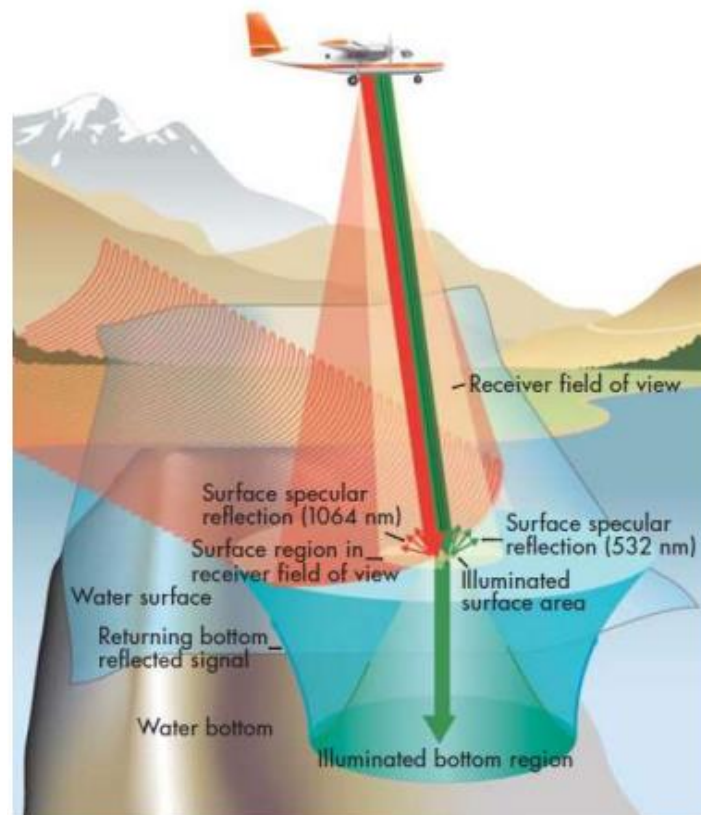


FIGURA 27. LIDAR BATIMÉTRICO. FUENTE: *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

## **CONCLUSIONES**

Durante este Trabajo Integrador pudimos apreciar la utilidad y complejidad que implica el sistema LIDAR y esto nos lleva a analizar las cifras económicas que implican su utilización. Tendremos que tener en cuenta que solo pudimos conseguir valores provenientes de España, eso significa que los costos podrían ser aún mayores a los que llega ésta conclusión.

Los costos del LIDAR son muy variables por lo que resulta difícil hacer una estimación de los mismos. En un proyecto LIDAR intervienen muchos factores que afectarán a sus costos entre los que podemos citar:

- Costos por desplazamiento de equipamiento (avión y sensores). Este puede considerarse un costo fijo en el proyecto, independiente de la configuración utilizada después.
- Densidad de puntos. A mayor densidad, mayores costos.
- Características topográficas del terreno.
- Accesibilidad.
- Características de la vegetación.
- Área a relevar.
- Márgenes de tiempo.
- Calidad del producto a entregar.

Los factores anteriores hacen referencia fundamentalmente a la adquisición de los datos, a éstos habrá que añadir los factores relacionados con el procesamiento y el desarrollo de metodologías apropiadas para su análisis.

ARMADA ARGENTINA  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Sensor	Área del proyecto	Costes adquisición	Costes análisis	Total costes monitoreo	Fuente
<b>LIDAR aeroportado</b>	28,000 km <sup>2</sup> (UK)			415US\$/k m <sup>2</sup>	Patenaud e et al., 2005
<b>LiDAR aeroportado</b>	40 km <sup>2</sup> (USA, escala local)			455 US\$/km <sup>2</sup>	Tilley et al., 2004
<b>LiDAR aeroportado</b>	400 km <sup>2</sup> (USA)			100 US\$/km <sup>2</sup>	Tilley et al., 2004

Sensor	Área del proyecto	Costes adquisición	Costes análisis	Total costes monitoreo	Fuente
<b>LIDAR + imágenes</b>	Hasta 200,000 ha (solo LiDAR)	350-450 US\$/km <sup>2</sup>			Arbonaut
	Hasta 2,000,000 ha (muestreo en dos etapas: LiDAR + imagen)	400-600 US\$/km <sup>2</sup>			
	Desde 20,000,000 ha (muestreo en dos etapas: LiDAR + imagen)	70-150 US\$/km <sup>2</sup>			

TABLA 3. COSTOS DEL LIDAR. FUENTE: *Universidad de Ancará.*

**ARMADA ARGENTINA  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR**

Viendo los valores brindados por diversas fuentes, y teniendo en cuenta los recursos con los que hoy en día dispone la Armada Argentina nos lleva a hacer un rápido análisis y determinar que la adquisición de este sistema no es absolutamente necesaria. No obstante, va a llegar el momento en el que comercio internacional crezca de tal manera en nuestro país, que las Unidades con las que cuenta no van a ser suficientes. Será el punto en el que desplazar un aeronave a diversos lugares del litoral marítimo, donde sea requerido hacer relevamientos precisos, sea más económico que mantener varias embarcaciones con sus respectivas tripulaciones. Esto nos lleva a decir que el personal del Servicio de Hidrografía deberá mantenerse actualizado en las últimas tecnologías a efectos de que cuando el Servicio Naval lo requiera, estar a la altura de las circunstancias.

## REFERENCIAS

---

<sup>i</sup> Ferros Planes (05/02/2018) *¿Cómo funciona un láser? Lo explicamos de forma sencilla.*

Recuperado de <https://ferrosplanes.com/como-funciona-un-laser/>

<sup>ii</sup> Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. *Introducción a los láseres.* Recuperado de

[http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/cbi/mfg/laseres1/material\\_adicional/semiconductor/DANIEL.html](http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/cbi/mfg/laseres1/material_adicional/semiconductor/DANIEL.html)

<sup>iii</sup> CorDEX Instruments. *Why use a Laser Distance Meter? Understanding the technology.* (Folleto)

<sup>iv</sup> Ingeniero Mariano García Alonso. *Evaluación del uso de la tecnología LIDAR en la estimación del contenido de carbono forestal.* COMPLUTIG/Universidad de Andalus.

<sup>v</sup> GISGeography (14/11/2019). *A Complete Guide to LIDAR: Light Detection and Ranging.*

<https://gisgeography.com/lidar-light-detection-and-ranging/>

<sup>vi</sup> Ingeniero Mariano García Alonso. *Evaluación del uso de la tecnología LIDAR en la estimación del contenido de carbono forestal.* COMPLUTIG/Universidad de Andalus.

<sup>vii</sup> Ingeniero Mariano García Alonso. *Evaluación del uso de la tecnología LIDAR en la estimación del contenido de carbono forestal.* COMPLUTIG/Universidad de Andalus.

<sup>viii</sup> Ramiro A. Varela, Gabriel Rosón Porto. (marzo 2008). *Métodos en Oceanografía Física.* (pp. 73-74) España. Ed. Anthias.