



ACADEMIA MEXICANA  
DE ÓPTICA, A.C.



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015

Explorando en la Óptica, ACADEMIA MEXICANA DE ÓPTICA, A.C.

Edición especial celebrando el 2015 Año Internacional de la Luz.

## **LIDAR: un recurso láser para la inspección remota**

G. Rodríguez-Zurita<sup>1,2</sup>, O. M. Martínez-Bravo<sup>1,2</sup>, N. A. Vásquez-Pazmiño<sup>1</sup> y C. Costa-Vera<sup>1</sup>

(1) *Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Quito, Ecuador.*

(2) *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Puebla, México.*

**Resumen.** Se presenta a la técnica LIDAR (“Light Detection and Ranging”) como un sistema láser capaz de monitorizar componentes atmosféricos (aerosoles), velocidades de vientos y topografía de resolución en el orden de metros. Se describen brevemente tanto sus rangos de trabajo como sus componentes básicos y se ofrecen algunos ejemplos.

### INSPECCIÓN REMOTA.

La formación del catálogo de reservas de un país requiere de métodos de inspección apropiados que permitan medir la evolución de los recursos naturales inspeccionados para evaluar el estado en que se encuentren con la suficiente frecuencia. Así mismo, mientras mejor se monitoree la calidad y el estado de un recurso, mejor será el conocimiento de la resistencia que presente a su racional explotación, así como su interdependencia con el resto de factores circundantes. Esta información resulta de importancia primordial debido a que fundamenta naturalmente las estrategias de explotación racional para mantener la renovación del recurso. Para vigilar efectivamente su sustentabilidad.

Por otra parte, el cuantificar frecuentemente los factores ambientales que determinan actividades y salud humanas resultan en información crítica durante la toma de decisiones en el ejercicio de las políticas públicas.

La inspección remota consiste en una serie de técnicas que ofrecen capacidades globales de inspección dinámica para aportar datos muy fiables en el estudio de terrenos (topografía), de la calidad de aire (detección y clasificación de partículas en la atmósfera) o del mar (mediciones de densidades de fitoplancton y de zooplancton), y de velocidades de vientos y de corrientes marítimas. Se aplica en clasificación de nubosidades (formación de nubes), y para el despliegue de construcciones civiles (que incluyen las construcciones arqueológicas cubiertas parcialmente por la selva aún). Entonces, la inspección remota responde a las necesidades de la monitorización de los recursos naturales y del ambiente ya mencionadas.

La inspección remota se caracteriza por mediciones de campo capturadas desde distancias relativamente apartadas del área (o volumen) de estudio, lo cual permite la cobertura de regiones grandes en tiempos muy cortos (fracciones de segundo). Resultan así grandes volúmenes de datos globales que pueden no sólo redundar las mediciones locales (para calibración y para cotejo), sino complementarlas, obteniéndose altas densidades de datos de campo con mucho menos esfuerzo, menos tiempo y menor riesgo. Aunque estas características remitan a las observaciones que en los inicios de las mismas se hacían (tales como las observaciones satelitales con cámaras de alta resolución multi-espectrales o las técnicas fotográficas aéreas, como las fotogramétricas), el desarrollo de otras técnicas fundamentadas en láseres presentan una amplia paleta de nuevos recursos de inspección con bases equipadas no satelitales que pueden ser tanto fijas como móviles y con distintos grados de automatización para su operación. Las bases móviles incluyen vehículos adaptados convenientemente, tales como camionetas VAN, yates, avionetas, helicópteros, drones y robots todo terreno. Los datos conseguidos pueden distribuirse en redes de conexiones nacionales o mundiales para construir, alimentar o restringir modelos climatológicos globales, por ejemplo.

Otra buena característica de estas técnicas consiste en la relativa libertad tecnológica implicada ya que, aunque no excluyen su incorporación en satélites con grandes ventajas, no dependen de la tecnología satelital de manera intrínseca. Así mismo, puede decirse que la eficiencia de sistemas terrestres en condiciones climatológicas adversas (nubosidad, lluvia), es superior a las satelitales.

## LIDAR.

Las bases terrestres fundamentadas en láseres emitiendo en el rango visible (o cercano infrarrojo o ultravioleta) se conocen como sistemas LIDAR, abreviación de “*Light Detection and Ranging*”. La abreviación es semejante al acrónimo RADAR (“*Radio-waves Detection and Ranging*”) y ambas técnicas utilizan la medición del tiempo invertido por aquella señal retornada por algún objeto relativamente distante, tras de ser inicialmente emitida desde una base emisora. Tal medición proporciona la distancia del objeto a la base. La cobertura de un área (o volumen) se realiza mediante barridos, que pueden ser, para el caso de bases fijas, angulares acimutales a elevación constante y/o de elevación a acimut constante (PPI y RHI en terminología de Radar, respectivamente y como referencia). Barridos en ambos ángulos dan lugar a sistemas 3D. Sin embargo, existen otras formas de barrido para, por ejemplo, sistemas móviles de translación lineal constante, como barridos en zigzag, lo cual proporciona, a su vez, imágenes con técnicas de aberturas sintéticas, como sucede con el LIDAR en aire.

El LIDAR se funda en el esparcimiento o retro-esparcimiento de la radiación incidente en las partículas bajo inspección. El nivel de potencia radiada esparcida o retro-esparcida depende principalmente del tamaño de la partícula que esparce (de radio  $r$ ) en relación a la longitud de onda usada para la inspección. De allí la diferencia en el tratamiento específico de la radiación retornada a la fuente (el “eco” correspondiente al RADAR, o al SONAR en caso de sonido o ultrasonido) ya que las longitudes de onda en LIDAR se hallan dentro de rangos de las micras a las décimas de micras.

Destacan primero dos tipos de esparcimiento: el tipo Rayleigh ( $r$  mucho menor que la longitud de onda, nombrado por John William Strutt, tercer lord Rayleigh. Rango que describe la coloración azul del cielo terrestre) y el tipo Mie ( $r$  poco menor o mayor que la longitud de onda, nombrado así por Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie). Se conocen como esparcimientos elásticos debido a que las partículas que re-radian no modifican la longitud de onda incidente en ellas. La Tabla 1 ilustra someramente algunas de las partículas concretas detectables con 0.4 micras como longitud de onda incidente.

Pero existe otro tipo de esparcimiento que sí modifica la longitud de onda incidente, y es llamado esparcimiento inelástico. El esparcimiento tipo Raman (por Chandrasekhara Raman) es inelástico y describe la generación de bandas laterales en la radiación re-radiada. Las bandas resultan a ambos lados de la radiación incidente: las de mayor longitud de onda se llaman bandas Stokes, mientras que las bandas de longitudes de onda menores, anti-Stokes. Permiten éstas discriminar entre oxígeno molecular y nitrógeno molecular por generarse bandas espectrales suficientemente separadas, por ejemplo usando 0.355 micras (355

nm) como la longitud de onda incidente. O diferenciar entre moléculas de agua en nubes como gotas o como hielo, detectando el total al usar el punto isobéctico (cerca de los 400 nm) empleando la misma longitud de onda de 355 nm. El punto isobéctico es el valor de la longitud de onda a la cual la absorción es igual para distintos agregados de moléculas del mismo compuesto.

Tabla 1.

Tipo de partícula	d (micras)	Esparcimiento
Moléculas constituyentes del aire	0.0001 - 0.001	Rayleigh
Aerosoles	0.01 - 1.0	Mie
Gotas en nubes	10-100	Geométrica

Dependiendo de las condiciones atmosféricas, según las energías involucradas, el LIDAR alcanza distintos tipos de penetraciones desde tierra, aunque los rangos típicos en condiciones no lluviosas o no muy nubosas permiten inspecciones troposféricas (hasta alrededor de los 10 km snm) y estratosféricas (hasta alrededor de los 50 km snm). Puede haber sistemas de alcance mesosférico (hasta alrededor de los 80 km snm).

#### INSTRUMENTACIÓN BÁSICA DEL LIDAR.

Un sistema LIDAR requiere de una fuente emisora láser, usualmente pulsada, apuntada a la región de inspección. La retro-radiación se capta, colinealmente como regla, con un espejo cóncavo que dirige y concentra la señal a un fotodetector sensible y lineal (tubo fotomultiplicador). Los posicionamientos pueden efectuarse con micro-motores. La estrecha relación de este sistema de captura con sistemas propios de telescopios astronómicos explica la inicial adaptación de éstos para sistemas LIDAR y da una idea de los requerimientos básicos. La detección se sincroniza con el pulso incidente mediante un seguidor de transitorios y se digitaliza la señal con él mismo para su posterior envío y procesamiento.

Para esparcimientos elásticos, la potencia detectada por el PMT es la directamente transferida al sistema de procesamiento, que puede ser una PC local o remota enlazada por ETHERNET.

En el caso del esparcimiento inelástico, la señal captada debe optimizarse para separarse en distintas longitudes de onda de manera eficiente de acuerdo al espectro de retro-esparcimiento característico. Para ello, pueden usarse divisores de haz dicróicos y acoplamientos con fibras ópticas. Para detecciones Raman de nitrógeno como se describió en párrafos anteriores por ejemplo, las separaciones espectrales se realizan alrededor de los 387 nm. Pero si los anchos de banda fueran más estrechos, se tiene que recurrir a técnicas espectroscópicas de alta resolución, tales como filtros con uno o dos etalones Fabry-Perot, celdas de vapor de yodo, o sembradío de fotones para el láser .

Los sistemas diseñados para detecciones atmosféricas pueden operar en estaciones fijas. Pero pueden adaptarse también a vehículos, ganando así gran movilidad, pero con las correspondientes restricciones de energía o relativas al sistema de barrido. Muchas unidades adaptadas a camionetas VAN, por ejemplo, miden especialmente en modo vertical el grosor óptico vertical del aerosol.

Los sistemas LIDAR en aire, tales como los diseñados para topografía, se adaptan a aviones o avionetas equipadas con sistemas de navegación por satélite y con sistemas inerciales referidos a un punto terrestre. Así mismo, estos sistemas LIDAR difieren de los atmosféricos en los barridos, ya que éstos no son angulares. Los barridos satelitales (misión CALIPSO, por ejemplo) son también distintos en razón de la órbita particular por la cual se trasladan.

Existen formatos estándares para los datos generados, a fin de compartirlos en red globalmente.

#### ALGUNOS SISTEMAS LIDAR ESPECÍFICOS.

De las numerosas variantes o ampliaciones de las capacidades mencionadas de un LIDAR para mediciones atmosféricas, se mencionan dos de ellas principalmente.

Para medición de velocidades se pueden emplear mediciones basadas en el efecto Doppler (Doppler LIDAR), empleadas para monitorización de corrientes atmosféricas. Una aplicación ya extendida es la detección de cambios bruscos de corrientes en aeropuertos. Se pueden ver en los aeropuertos internacionales de Las Vegas, Tokio, Osaka, Londres, Nueva York, San Francisco, Frankfurt am Main, Múnich, Bangkok y, más recientemente, en Dubai. Estos sistemas visualizan igualmente las corrientes frías que fluyen hacia la superficie terrestre generadas por tormentas eléctricas ("wind shear"). En el aeropuerto de Hong Kong, un sistema LIDAR Doppler permite el despliegue en pantalla de las corrientes de aire turbulentas del frente de un avión aterrizando, mientras que un segundo sistema similar situado frente al primero exhibe las corrientes turbulentas formadas atrás

de un avión en su despegue. Toda esta información se transfiere a los pilotos del avión, ya que les resulta de gran valor en sus maniobras de vuelo.

Para detección de densidades y exhibición de partículas suspendidas de acuerdo a su forma, un sistema LIDAR por depolarización es empleado. Una misma longitud de onda, 532 nm por ejemplo, se envía linealmente polarizada y en su detección se mide no sólo la polarización lineal inicial, sino también la lineal perpendicular retro-esparcida. El cociente de las señales correspondientes es distinto si las partículas son esféricas (cercano a cero) o sin forma definida. El sistema LIDAR por depolarización es indicado para medir concentraciones de cenizas volcánicas en aire.

En los sistemas LIDAR se ha desarrollado también la técnica diferencial, que emplea dos haces láser, la fluorescente resonante, y muchas otras más.

#### EJEMPLOS DE APLICACIONES LIDAR.

##### *Aeropuertos y volcanismo.*

Para ilustrar las dos técnicas mencionadas, pueden primero considerarse las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestos los aeropuertos suficientemente cercanos a volcanes activos, tal como sucede con los aeropuertos de la ciudad de México (cercano al volcán Popocatepetl), el de Arequipa en el Perú (cercano al volcán Misti), el de la ciudad de Quito (vecino de los volcanes Pichincha y Reventador) o el de Guayaquil (cerca del Tungurahua y del Sangay). No es necesario referirse a eventos catastróficos para percatarse de los grandes inconvenientes en el tráfico aéreo generados por actividades volcánicas aun moderadas. En particular, tras las experiencias con las emisiones del volcán Eyjafjallajökull en 2010 (cuyas cenizas se esparcieron desde el valle Þórsmörk en Islandia y se expandieron hasta la Europa continental), se reconoce que bastan ciertos niveles de ceniza para obstaculizar el giro de las turbinas propulsoras de los aviones comerciales. Con el incremento sostenido del 4% en el tráfico aéreo latinoamericano, por ejemplo, en la Comunidad Andina de Naciones (CAN), la importancia de la monitorización de niveles de cenizas en la tropósfera es evidente tan sólo considerando el aspecto económico: tanto se puede evitar la pérdida de decenas de millones de dólares al tolerar tráfico en niveles seguros de cenizas, como se puede arriesgar fatalmente el cargo junto con el vehículo que lo transporta al permitir el tráfico en niveles inseguros. El establecimiento de niveles medibles es fundamental para el establecimiento de medidas de seguridad e interrupciones en tráfico aéreo que sean objetivas y justificadas. Y, desde luego, no sólo el tráfico aéreo resultaría configurado por semejante vigilancia atmosférica frecuente: los niveles aceptables sin protección respiratoria para los ciudadanos expuestos a emisiones volcánicas, constituyen una cuestión de salud

pública también muy directamente beneficiada por los sistemas de monitorización apropiados.

El interés intrínseco del estudio de cenizas en plumas volcánicas aporta datos esenciales para el entendimiento de la dinámica volcánica.

#### *Corrientes atmosféricas y dinámica climática.*

Como segundo caso, se pueden revisar las condiciones geográficas particulares de las regiones sobre la línea ecuatorial. Se conoce que las corrientes atmosféricas a nivel global se distribuyen en un patrón que sigue tres tipos de celdas principales a ambos lados de la línea ecuatorial: las celdas de Hadley, las de Ferrel y las polares. Las dos celdas de Hadley van aproximadamente desde 0° hasta los 30° de latitud (Norte o Sur). Las dos celdas de Ferrel van de los 30° a los 60° en cada hemisferio también. Estas cuatro celdas forman cinturones, mientras que las dos celdas restantes, las polares, forman casquetes. La frontera entre las dos celdas de Hadley suele coincidir bastante bien con la línea ecuatorial geográfica, como algunas fotografías satelitales ponen en evidencia en la distribución de nubes correspondiente. Por ello, una red de detectores Doppler LIDAR tomando muestras sobre dicha línea para medir velocidades de viento en tropósfera y estratósfera aportaría datos de gran valor en relación a modelos predictivos climáticos globales en computadoras, para su desarrollo y para su prueba. La red no necesariamente constaría de estaciones fijas terrestres porque puede también incluir sistemas transportados por mar. Una red semejante podría formarse en las fronteras de las celdas Hadley y Ferrel, dotando de datos invaluable y frecuentes al servicio del estudio de la dinámica atmosférica global y sus cambios reales.

Cabe mencionar la existencia de al menos cinco estaciones LIDAR en operación ya en la Antártida, como la estación McMurdo, que penetra la mesósfera y la baja termósfera y capaz de detectar nubes noctiluscentes localizadas alrededor de los 85 km de altura y que son indicadores adicionales de temperatura en la mesopausa y, por tanto, aportan datos sobre el calentamiento global entre muchas otras características. O la estación Davies, equipada con un Doppler LIDAR incoherente y filtro Fabry-Perot. En la estación Dumont d'Urville, un sistema LIDAR (POLE) ha monitorizado los niveles de ozono entre los 8 y los 40 km de altitud.

## CONCLUSIONES.

El sistema LIDAR es una técnica óptica para la inspección remota de recursos naturales. Es transdisciplinaria e involucra tecnología láser, técnicas espectroscópicas de alta resolución e instrumentación de telescopios astronómicos. La repercusión de los datos obtenidos por el monitoreo con el uso de un sistema LIDAR es de relevancia local y global, siendo muchos de sus usuarios científicos finales geólogos, vulcanólogos, meteorólogos, climatólogos, oceanógrafos o arqueólogos.

Del lado de las aplicaciones más directas de los sistemas LIDAR, se encuentran la ingeniería civil, la gestión del tráfico aéreo, la gestión de las contingencias ambientales, la supervisión de la contaminación atmosférica y la supervisión en impactos de técnicas agrícolas.

## REFERENCIAS RECIENTES EN RED.

### Alcances atmosféricos

<http://archive.larouchepac.com/node/16329>

<http://pcl.physics.uwo.ca/science/lidarintro/>

### Barrido a acimut constante

<http://www.ung.si/en/research/centre-for-atmospheric-research/otlica-observatory/>

### Series temporales

<http://www.wunderground.com/blog/JeffMasters/comment.html?entrynum=1464>

### Sistemas en aire (airborne LIDAR)

<http://www.freerepublic.com/focus/chat/2510992/posts>

### Actividades volcánicas

[http://www.metoffice.gov.uk/publicsector/emergencies/civil\\_contingency\\_aircraft](http://www.metoffice.gov.uk/publicsector/emergencies/civil_contingency_aircraft)

<http://halo-photonics.com/LiDAR-environmental-monitoring-data-examples.htm>

### Celdas Hadley y fotografías satelitales

<http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/global-circulation-patterns>

<http://milliethgeographer.blogspot.com/2012/03/atmosphere-and-circulation-help.html>



Explorando en la Óptica, ACADEMIA MEXICANA DE ÓPTICA, A.C.

Edición especial celebrando el 2015 Año Internacional de la Luz.

[http://www.atmos.washington.edu/2002Q4/211/notes\\_rainfall.html](http://www.atmos.washington.edu/2002Q4/211/notes_rainfall.html)

Calipso

<http://www.keesfloor.nl/artikelen/zenit/calipso/index.htm>

Antártida

<http://antarcticsun.usap.gov/science/contenthandler.cfm?id=2754>

<http://www.antarctica.gov.au/about-us/publications/australian-antarctic-magazine/2001-2005/issue-1-autumn-2001/science/davis-lidar-commences-atmospheric-observations>