

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA**  
**“ING. JORGE L.TAMAYO” A.C.**

**CentroGeo**

**Centro Público de Investigación CONACYT**

**“EL MODELADO GEOMÁTICO DEL LIDAR:  
DE LA FUSIÓN SVM A LA NOCIÓN DE PROSDETECCIÓN”**  
**TESIS**

Que para obtener el grado de Maestro en Geomática

Presenta

**Edson Armando Real Sánchez**

Supervisor Principal:

***Dra. Alejandra Aurelia López Caloca***

Comité Supervisor:

***Dra. María del Carmen Reyes Guerrero***

Comité Supervisor:

***Dr. José Luis Silván Cárdenas***

México, D.F., 26 de enero de 2011

## **RESUMEN**

En esta tesis se estudia la geotecnología LiDAR, desde sus fundamentos teóricos y tecnológicos, hasta su funcionamiento y aplicaciones en diversos ámbitos de la Geomática. En particular, se procesan datos LiDAR 3D aerotransportados de la zona de Ostuacán, Chiapas, 2007. Bajo el marco de fusión de datos por extracción de características se procesaron dichos insumos con imágenes satelitales multiespectrales SPOT-5 de la misma zona, fusionando y validando las clases de usos de suelo obtenidas, producto de la integración de dichos datos. Al final se propone un planteamiento conceptual sobre la emergencia del marco de conocimientos de la geotecnología LiDAR en escala terrestre.

**Agradecimientos:**

## Teóricos:

Enrique Muñoz, Gabriela Quiroz y en especial a Fernando López Caloca y Elvia Martínez

## Técnicos:

Camilo Caudillo, Edgar Rosales, Betsabé de la Barreda, Ameris Contreras, Isidro Rangel, Beatriz Moncada, Javier Martínez y en especial a Francisco Suárez.

## Adquisición de datos:

GT-SITGER, en especial al Dr. Omar Tapia.

ERMEX, en especial al Mtro. Jesús Trujillo.

Cuya disposición por compartir estos datos fue decisiva en la elaboración de esta tesis.

# **“EL MODELADO GEOMÁTICO DEL LIDAR: DE LA FUSIÓN SVM A LA NOCIÓN DE PROSDETECCIÓN”**

INTRODUCCIÓN.....	1
1. LA INTEGRACIÓN DEL LIDAR EN LA GEOMÁTICA.....	4
1.1 LiDAR y modelado geoespacial	
1.2 LiDAR y Geomática	
2. ASPECTOS TÉCNICOS DEL LIDAR AEROTRANSPORTADO.....	7
2.1 Antecedentes del LiDAR	
2.2 Componentes del LiDAR aerotransportado	
2.1.1 Vehículo	
2.1.2 Sensor	
2.1.3 Emisión de energía (sistema de barrido)	
2.1.4 Sistema inercial	
2.1.5 Receptor GPS	
2.1.6 Procesamiento digital	
2.1.6.1 Correcciones	
2.1.6.2 Almacenamiento de datos (modelo de nube de puntos)	
2.1.6.3 <i>Softwares</i> de procesamiento	
2.1.7 Salida (productos)	
3. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	26
3.1 Contexto de investigación	
3.1.1 Datos y sitio de estudio	
3.1.1.1 Nube de puntos LiDAR	
3.1.1.2 Imágenes multiespectrales	
3.2 Metodología experimental	
3.2.1 Fusión de datos	
3.2.1.1 Fusión por extracción de características	
3.3.2 Máquinas de soporte vectoriales	
3.3 Procesamiento	
3.4 Resultados	
3.4.1 Clasificación supervisada y validación	

### 3.4.2 Análisis de resultados

<b>4. TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Línea de investigación: Percepción Cercana/<i>Prosdetección</i></b>	
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>56</b>
<b>I. APLICACIONES DEL LIDAR EN DISCIPLINAS</b>	
<b>II. SENSORES LIDAR</b>	
<b>III. FORMATOS DIGITALES DE MODELOS LIDAR</b>	
<b>IV. <i>SOFTWARES</i> DE PROCESAMIENTO LIDAR</b>	
<b>V. NIVELES DE FUSIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURADAS</b>	
<b>VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>

## **LISTA DE TABLAS**

**Tabla. 2.1** Áreas del LiDAR y sus aplicaciones

**Tabla. 2.2** Niveles de seguridad láser *IEC 60825-1 Standar*

**Tabla. 2.3** Patrones de barrido

**Tabla. 2.4** Columnas y filas de un archivo.LAS visualizado en el *Software FUSION*

**Tabla. 3.1** Aplicaciones del sensor ALS40

**Tabla. 3.2** Características del modelo de nube de puntos recortados

**Tabla. 3.3** Características de las imágenes SPOT-5

**Tabla. 3.4** Síntesis de validación de las pruebas en *Monteverdi*

**I. APLICACIONES DEL LIDAR EN DISCIPLINAS**

**II. SENSORES LIDAR**

**III. FORMATOS DIGITALES DE MODELOS LIDAR**

**IV. SOFTWARES DE PROCESAMIENTO LIDAR**

**V. NIVELES DE FUSIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURADAS**

## **LISTA DE FIGURAS**

- Fig. 2.1** Esquema de las áreas del LiDAR.
- Fig. 2.2** Esquema de proyecto de LiDAR aerotransportado.
- Fig. 2.3** Imagen sistema *ToF*.
- Fig. 2.4** Imagen sistema *Phase-based*.
- Fig. 2.5** Imágenes de retornos LiDAR en un dosel forestal.
- Fig. 2.6** Esquema de modelos digitales a partir del LiDAR.
- Fig. 3.1** Esquema de la metodología de fusión-clasificación de puntos LiDAR e imágenes hiperespectrales.
- Fig. 3.2** Esquema de la propuesta de la propuesta metodológica experimental.
- Fig. 3.3** Ubicación de la zona de estudio.
- Fig. 3.4** Imágenes de líneas de vuelo-cobertura LiDAR, el círculo señala la zona de Ostuacán.
- Fig. 3.5** Imágenes del archivo LiDAR Ostuacán.
- Fig. 3.6** Imágenes SPOT-5 Multiespectral y SPOT-5 PAN.
- Fig. 3.7** Esquema de los niveles de fusión.
- Fig. 3.8** Esquema gráfico de la minimización del riesgo estructural.
- Fig. 3.9** Imágenes de hiperplano lineal e hiperplano no lineal.
- Fig. 3.10** Esquema del modelo del *Optimum Separation Hyperplane* OSH.
- Fig. 3.11** Modelo digital de elevación y malla de intensidad.
- Fig. 3.12** Imágenes SPOT-5 Multiespectral y SPOT-5 PAN de la zona de Ostuacán.
- Fig. 3.13** Imagen compilada multiespectral-pancromática de cinco capas e imagen compilada multiespectral-pancromática-elevación e intensidad de siete capas.
- Fig. 3.14** Imagen multiespectral-pancromática de la zona de estudio con los sitios de entrenamiento y algunas nomenclaturas.
- Fig. 3.15** Imagen resultante de la primera prueba.
- Fig. 3.16** Matriz de confusión e índice kappa de la primera prueba.
- Fig. 3.17** Imagen resultante de la segunda prueba.
- Fig. 3.18** Matriz de confusión e índice kappa de la segunda prueba.
- Fig. 3.19** Imagen resultante de la tercera prueba.
- Fig. 3.20** Matriz de confusión e índice kappa de la tercera prueba.

**Fig. 3.21** Imagen resultante de la cuarta prueba.

**Fig. 3.22** Matriz de confusión e índice kappa de la cuarta prueba.

**Fig. 3.23** Integración de la imagen pancromática SPOT con el modelo digital de elevación LiDAR realizado en FUSION/LVD.

**Fig. 3.24** Integración de la imagen de la cuarta prueba en *Google Earth*.



*“Cuando cambian los paradigmas, el mundo cambia con ellos”.*

**Thomas S. Kuhn**

*“Cuando encontramos nuevos mundos, en vano luchamos para preservar el orden que ya conocíamos y finalmente dejamos de resistir y nos entregamos al nuevo modo de ver las cosas, donde quiera que éste nos pueda llevar, sabiendo que nuestras experiencias jamás nos parecerán las mismas”*

**William Shakespeare, La Tempestad.**

*“...antes que la escritura impresa se extendiera, la humanidad vivía en un espacio acústico... espacio sin fronteras ni dirección ni horizonte... La estructura (los tipos móviles) transformó el espacio en algo limitado, lineal, ordenado, estructurado y racional. La página escrita, con sus bordes, márgenes y caracteres definidos en renglón tras renglón trajo una nueva forma de ver el espacio, forzó al ser humano a comprender en forma lineal, uniforme, concatenada y continua. ...fue el surgimiento de un entorno enteramente nuevo... ...el pensamiento lineal produjo en la economía, la línea de montaje y la sociedad industrial. ...en la literatura, la narración cronológica... ...en la física, las visiones newtoniana y cartesiana del universo como un mecanismo para localizar un suceso en el tiempo y el espacio; en el arte, la perspectiva visual... ...la idea de la detención en un espacio cerrado como forma de corrección punitiva (la prisión)...”*

**Marshall McLuhan, La Galaxia Gutemberg.**

## INTRODUCCIÓN

*“La automatización de la Geografía... ..hará irreversible la integración del geógrafo en grupos interdisciplinarios y abrirá una oportunidad para que la Geografía pueda ocupar un lugar destacado en el contexto de las ciencias”.* Esta posibilidad referida por *Dobson* en 1983, ahora es posible gracias a los avances del GPS, SIG, *Google Maps* o redes sociales, porque facilitan la espacialización del conocimiento proveniente de varias disciplinas científicas y sociales. Sin embargo, *Dobson* no se percataría, que no sería la automatización geográfica por si misma la que daría este gran salto, sino las geotecnologías integradas en la Geomática. Dichas geotecnologías permiten desarrollar y evolucionar a la Geomática, y a partir de ésta a las mismas geotecnologías recíprocamente. Una de éstas, el LiDAR escanea tridimensionalmente objetos geoespaciales de forma remota y cercana, generando nuevas aproximaciones científicas desde la perspectiva del observador, principalmente en el análisis, modelado y percepción geoespacial, en el especialista como no especialista en temas geoespaciales.

En regiones con tradición en investigación científica y desarrollo tecnológico (Norteamérica, Europa, Asia), la aplicación del LiDAR aerotransportado y terrestre se orienta hacia problemas profesionales, comerciales y académicos. En el caso de México, en el área académica de la Geografía y Geomática, existe el **problema** que poco se ha investigado y aplicado datos LiDAR, a pesar de contar con sensores aerotransportado (INEGI) o terrestre (INAH). Por ello, es *justificable* y *necesario* que en nuestro país se conozca y aproveche más esta tecnología en el entendimiento, análisis y mitigación de problemas sociales, permitiendo vincular la investigación científica y práctica tecnológica con el contexto social donde se inserta.

En base al planteamiento anterior, el **objetivo principal** de esta tesis es **estudiar las ventajas tecnológicas del LiDAR en la Geomática**, principalmente en el modelado geoespacial, que permitan aprovechar las ventajas técnicas de dicha tecnología en estudios y planteamientos posteriores. Para desarrollar este objetivo se plantean los siguientes **objetivos secundarios**:

- **Objetivo secundario 1:** *Estudiar los procesos teóricos y prácticos de integración y emergencia del LiDAR dentro de la Geomática.*
- **Objetivo secundario 2:** *Estudiar de forma práctica un ejemplo de fusión de datos LiDAR y SPOT-5 en una propuesta metodológica.*

En base a los objetivos anteriores, se plantean las siguientes **hipótesis de trabajo**:

- **Hipótesis 1:** *Para contestar el objetivo secundario 1, se plantea que el LiDAR se está integrando con otras geotecnologías -como la fotogrametría terrestre y la Geo-cibernética-. Se propone la noción de Percepción Cercana o Prosdetección como un nuevo marco de conocimiento dentro de la Geomática.*
- **Hipótesis 2:** *Para alcanzar el objetivo secundario 2, en la propuesta metodológica se fusionan los datos 3D LiDAR e imágenes multiespectrales SPOT-5 por medio del algoritmo Máquinas de Soporte Vectorial. Esta metodología utiliza datos de la zona de Ostuacán, Chiapas del 2007 para mejorar la clasificación de los usos de suelo en dicho lugar.*

Para alcanzar los objetivos de esta tesis y comprobar las hipótesis planteadas, es necesario articularlas dentro del marco conceptual del **modelado geoespacial**, porque éste permite una mejor comprensión de la emergencia del LiDAR, al estructurar e integrar los planteamientos conceptuales y aspectos técnicos de **forma integral**, ya que éstos no están desvinculados ni desarticulados, sino forman parte del propio proceso del modelado. De esta manera, este trabajo se estructura en 4 capítulos:

En el **Capítulo 1. La integración del LiDAR en la Geomática**, se presentan aspectos teóricos sobre el modelado geoespacial y las geotecnologías, para comprender la relación e integración del LiDAR en la ciencia geomática, permitiendo la transformación del modelado digital en conocimiento científico.

El **capítulo 2. Aspectos técnicos del LiDAR aerotransportado**, se presentan algunos aspectos técnicos del LiDAR, breves antecedentes, con el objeto de entender y trabajar posteriormente el modelo digital LiDAR.

El **capítulo 3. Propuesta metodológica**, en este capítulo se muestra una metodología experimental dentro del marco de fusión de datos, permitiendo el manejo e integración de datos LiDAR aerotransportado e imágenes satelitales SPOT. Esta fusión se realiza a nivel de fusión por extracción de características por medio del algoritmo de clasificación Máquinas de Soporte Vectoriales. Como parte de la metodología se compararon artículos y se realizaron cuatro pruebas con resultados validados.

El **capítulo 4. Trabajo futuro**, a pesar de no trabajar con datos de LiDAR terrestre, se presentan propuestas teóricas sobre una posible línea de investigación en Geomática: *Percepción Cercana* o *Prosdetección*, en base a los avances técnicos del LiDAR a escala terrestre.

## 1. LA INTEGRACIÓN DEL LIDAR EN LA GEOMÁTICA

Toda tecnología, aplica de forma práctica el conocimiento científico y permiten a una sociedad, intervenir y transformar su realidad espacio-temporal. En el caso del **LIDAR**, (acrónimo inglés de *Light Detection And Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), es una geotecnología integrada en la Geomática que está generando nuevas representaciones digitales del espacio geográfico, facilitando el modelado y análisis de dicho espacio.

### 1.1 LiDAR y modelado geoespacial

La realidad que interactuamos está integrada por diversos fenómenos complejos que solamente pueden percibirse a través del tiempo-espacio. A través de esta dimensión, el ser humano construye **modelos**<sup>1</sup> por medio de procesos cognitivos y conocimiento científico que convergen en el proceso de modelado, permitiendo entender, interpretar y simplificar una parte de la realidad modelada.

Los **modelos tácitos** (conocido también como *mapa mental* o *modelo interno*) es una imagen cognitiva-mental de la realidad (*Holland, 2004:46-50*). *Varela y Maturana (1980:57)* junto con *Luhmann (1998:394)* plantean que estos modelos internos, permiten la *Autoreferencia*, es decir, la capacidad reflexiva que permite la diferenciación y autoreconocimiento. Este modelo tácito está en continua retroalimentación con la experiencia sensorial del ambiente y por lo tanto, está en cambiando incesantemente. Pero para que estos modelos internos puedan ser operativos y prácticos, es necesario transformarlos en **modelos explícitos** a través de la ciencia y la tecnología. Según *Jha (2009:36)* estos modelos explícitos parten de una serie de hipótesis construidas desde las *matemáticas (análisis)*; la *filosofía de la ciencia o Epistemología (lógica)*; la *Teoría General de Sistemas (síntesis)* y la *Visualización del Conocimiento (representación)* para que pueda el modelo expresar, validar y controlar esta realidad modelada.

Cabe destacar que todo modelo, tiene limitaciones y supuestos, ya que no pueden representar todos los componentes del fenómeno, porque algunos de ellos del suceden sólo en ciertos periodos de tiempo y circunstancias. Aun con estas limitaciones,

---

<sup>1</sup> Según Reyes un modelo es una representación o abstracción de una observación empírica (*2006:67-68*).

el modelado es parte integral de la construcción del conocimiento científico, que en el caso de las Ciencias de la Tierra, este proceso se realiza por medio del **modelado geoespacial**. Este modelado además de incorporar los bloques de conocimiento (*matemáticas, epistemología, sistemas y visualización*) integra el paisaje geográfico por medio de **mapas**. En éstos, dicho paisaje es abstraído y representado científicamente en la disciplina de la **cartografía**, por medio de la geometría-topología, sistemas de coordenadas y transformaciones esféricas-planas (Reyes,2006:68-69). Con estas construcciones matemáticas, se representa, comunica y simula información geoespacial en medios digitales.

El proceso de modelado geoespacial, requiere de artefactos, dispositivos, instrumentos y herramientas que interactúen con el paisaje geográfico. Estas tecnologías conocidas como **geotecnologías**<sup>2</sup>, ya que son las únicas tecnologías que hacen explícito la realidad geoespacial. El **LiDAR** es una **geotecnología** que modela por medio el escaneo de algunos atributos del paisaje geográfico, sea a escala remota (aviones) o cercana (tripiés o automóviles), generando modelos tridimensionales representados en medios digitales. De esta manera el LiDAR es una forma de cartografía tridimensional, ya que incorpora los procesos matemáticos de geometría-topología, sistemas de coordenadas y transformaciones esféricas-planas y con ellas representa y comunica el paisaje geográfico.

El LiDAR, al modelar el paisaje geográfico se relaciona con otras geotecnologías en forma de *competencia, complemento y exclusividad* (Lohani,2008).

- **Competencia:** el LiDAR está en competencia con otras geotecnologías (Fotogrametría aérea, Teledetección satelital y técnicas topográficas, como Altimetría o Planimetría) y en algunos casos, está desplazando ciertos artefactos geotecnológicos: algunos sensores terrestres LiDAR fijos, aumentan y mejoran la información que las estaciones totales topográficas.<sup>3</sup>

- **Complemento:** Cada vez hay una integración más estrecha entre LiDAR y otras geotecnologías: LiDAR aporta el volumen, mientras que las imágenes raster integran las

---

<sup>2</sup> Partiendo de Sobrino (2000:19), esta modelación se realiza a distancia/escala (cerca o lejana) sin que exista contacto material entre la tecnología, observador y el paisaje geográfico.

<sup>3</sup> Artefacto topográfico que estima ángulos, distancias y poligonales por láser. Es posible que el LiDAR terrestre sea una evolución de la estación total y que a la larga pudiera disminuir o extinguir su utilización, porque el LiDAR captura millones de puntos tridimensionales que la estación total tardaría más por procedimientos planimétricos.

características espectrales. La integración de ambos generan modelos más fidedignos, mejorando el análisis y representación de los objetos geoespaciales que se tratará de forma experimental en el capítulo 4.

- **Exclusividad:** hay ciertas aplicaciones y análisis en las que el LiDAR -por su reciente innovación-, es la única técnica que puede obtener ciertos datos geoespaciales que otras geotecnologías no pueden (p.e. maquetas tridimensionales vectoriales de puntos de alta resolución o modelos de superficies que identifican automáticamente estructuras arqueológicas cubiertas por la vegetación) (GBFC, 2009:19-21).

## 1.2 LiDAR y Geomática

Si bien todas las geotecnologías modelan y representan el espacio geográfico, es necesario que sus modelos sean validados científicamente para que sean coherentes con el paisaje geográfico que modelan. Para lograr esta validación y que se genere conocimiento, se necesitan de las disciplinas científicas, que por medio de sus métodos (principalmente matemáticos) permiten dicha validación y aprobación.

La **Geomática** es la ciencia geoespacial interdisciplinaria que estudia las relaciones espacio-temporales entre naturaleza y sociedad, expresadas mediante modelos tácitos y explícitos -destacando los modelos digitales-. Así la Geomática, a partir de las geotecnologías y del modelado, procesa y obtiene los modelos digitales del espacio geográfico. De esta manera, en la Geomática convergen diversas geotecnologías provenientes de diversas disciplinas científicas como *Percepción Remota y Fotogrametría; Geocomputación y Geoweb; Sistemas de Información Geográfica; Geodesia y Sistemas de Posicionamiento Global; Topografía y Cartografía; Cibercartografía y Geo-cibernética*, entre otras, en cuya convergencia se construye el conocimiento científico geoespacial.

En el caso del LiDAR, si bien tuvo sus fundamentos teóricos y prácticos en la Fotogrametría, Percepción Remota y Topografía (anexo 2.1) actualmente tiene ya sus propios algoritmos, metodologías y aplicaciones, que han evolucionado hacia una nueva disciplina propia en la escala terrestre (Capítulo 4), permitiendo la realización de análisis geoespaciales (medir distancias o volúmenes, clasificar patrones) y facilitar la comprensión visual del paisaje geográfico para el usuario o analista.

## 2. ASPECTOS TECNOLÓGICOS DEL LIDAR AEROTRANSPORTADO

Una vez conocida la incorporación del LiDAR en la Geomática, por medio del modelado en Geomática, en este capítulo se abordan algunos antecedentes y aspectos técnicos necesarios para el manejo de datos de LiDAR aerotransportado que serán procesados en la propuesta experimental del capítulo 3.

### 2.1 Antecedentes del LiDAR

Para entender los aspectos técnicos del LiDAR, es necesario conocer brevemente los antecedentes que permitieron la evolución del láser hacia el LiDAR. Físicamente, la luz del sol y de otras fuentes artificiales (como la bombilla), emiten radiaciones electromagnéticas a diferentes longitudes de onda, produciendo que dicha luz esté difusa y dispersa. El **láser**<sup>4</sup>, acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es una tecnología que estimula la radiación de la luz, amplificándola y concentrándola en un potente e intenso haz de luz, que se caracteriza por su coherencia -longitud de onda ordenada-, evitando que se disperse y ocasiona que se proyecte de manera puntual (RSAC,2008). Si bien el láser fue planteado teóricamente por Albert Einstein en 1916, Charles Townes y Arthur Leonard Schawlow lo desarrollaron como tecnología aplicada en 1958, en mediciones atmosféricas y satelitales (p.e. fue aplicada por la NASA para calcular la distancia entre la Tierra y la Luna en 1969) (Fowler et al. 2007:209).

En las décadas de los setenta y ochenta, el láser se utilizó en mediciones terrestres y topográficas: se crean los primeros láseres aerotransportados por la NASA, NOAA y la empresa *Avco Everett* (proyecto AOL). Estos instrumentos contaban con su propio generador eléctrico, eran enormes, pesados y altamente costosos (Shan y Toth,2008:3). En la década de los noventa, el láser empieza a utilizarse en levantamientos topográficos (Universidad de Stuttgart, programa ScaLARS) y en

---

<sup>4</sup> El láser puede clasificarse de varias maneras: longitudes de onda (infrarrojo, visible o ultravioleta); pulsos (continuo y discontinuo); potencia (alta, baja, amplia, corta). La potencia permite cortar, quemar, sublimar, marcar o medir diversos objetos, características aprovechadas en diversos ámbitos: informática (grabación de información en un DVD o CD); óptica y medicina (corrección de deficiencias visuales); seguridad vial (detector de la velocidad de los vehículos); aeronáutica espacial (medición precisa de las distancias y órbitas entre satélites o telescopios); telecomunicaciones (semiconductores de información); industria (grabar o marcar objetos); comercio (lectura de códigos de barras); restauración de arte (escáner), entre otras aplicaciones.



Percepción Remota, como sensor activo, obteniendo datos sin importar las condiciones atmosféricas (NASA, programas ATM-LAPF y GLAS). Pero lo más destacado, fue que el GPS validó la posición exacta de los impulsos láser, emergiendo así una el sistema geotecnológico LiDAR, destacando los sensores de las compañías *LeicaGeosystems* y *Optech Inc.* (Fowler et al. 2007:210).

La primera década del siglo XXI, se destacó por el desarrollo, diversificación de aplicaciones e innovación en sensores LiDAR (p.e. montados sobre un vehículo móvil e integración con otras geotecnologías), generando en el sector comercial topográfico, una explosión de nuevos *softwares*<sup>5</sup> y servicios derivados del escaneo (procesamiento y productos finales); y en el sector académico, la apertura de nuevas líneas de investigación y departamentos sobre LiDAR en centros, institutos y universidades,<sup>6</sup> así como el aumento de publicaciones especializadas, congresos y seminarios sobre esta geotecnología (Lichti et al. 2008). A pesar de todos estos avances, todavía hay profesionistas y académicos que aún desconocen las aplicaciones y ventajas del LiDAR frente a métodos tradicionales (BC-CARMS,2006:15-16).

---

<sup>5</sup> El mercado de los sensores LiDAR ha experimentado en estos últimos años un fuerte crecimiento, según Cary (2009:2-5) y Fowler et al. (2007:211), en 1995, existían sólo 3 sensores. Para el año 2000, 58 sensores. En 2006, 110 sensores y en 2008, 178 sensores, operados por 100 instituciones públicas y privadas: 45 estadounidenses, 29 europeas y 26 para el resto del mundo.

<sup>6</sup> Destacando las siguientes instituciones: *Instituto de Fotogrametría* de la Universidad de Stuttgart, (Alemania); *The Center of Mapping*, Universidad Estatal de Ohio y *Video and Image Processing Lab*, Universidad de California en Berkeley (EU); *Department of Geomatics Engineering*, Universidad de Calgary y *GeoEngineering Centre*, Universidad de Queen's en Kingston (Canadá); *Department of Earth Observation and Space Systems*, Universidad Tecnológica de Delft, (Holanda); *Institute of Photogrammetry and Remote Sensing*, Universidad Tecnológica de Helsinki (Finlandia); *Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad*, Universidad Politécnica de Cataluña (España) y el *Center for Spatial Information Science* de la Universidad de Tokio (Japón).

El LiDAR, tiene tres áreas en desarrollo (Fig. 2.1 y Tabla 2.2):

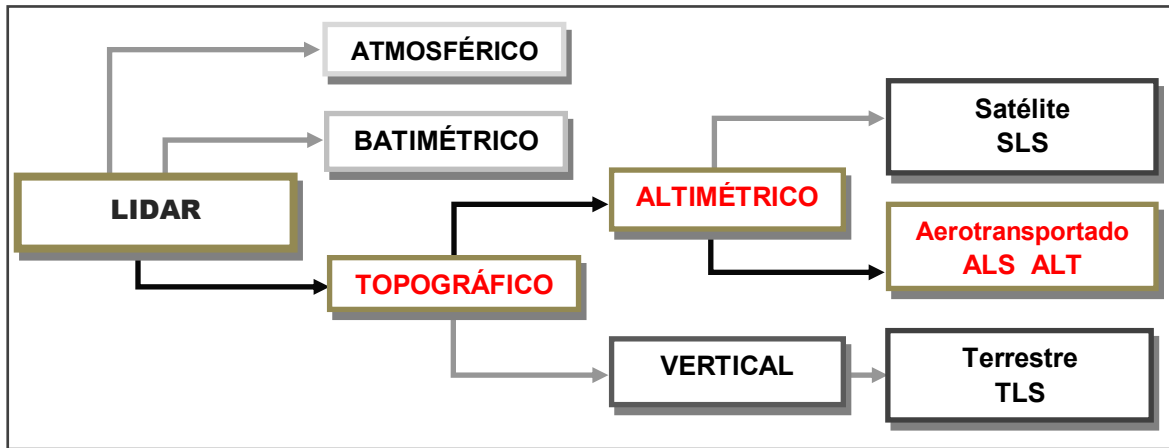


Fig. 2.1 Esquema de las áreas del LiDAR.

ÁREA	BANDAS LÁSER	APLICACIONES
ATMOSFÉRICO	Ultravioleta, visible (verde, rojo) e infrarrojo cercano.	Mediciones atmosféricas que permiten la elaboración de pronósticos meteorológicos: condiciones de temperatura, densidad, propiedades de nubes, detección de contaminantes y aerosoles, etc. Recientemente es utilizado en el estudio del impacto del Calentamiento Global.
BATIMÉTRICO	Azul y verde (el infrarrojo es absorbido por el agua)	Determinar la profundidad y escaneo de la topografía -fondo- del cuerpo de agua (dependiendo de la claridad del agua), por ejemplo, este escaneo se utiliza en el dragado de los canales de navegación en puertos marítimos (Burtch, 2002).
TOPOGRÁFICO	Infrarrojo cercano	Realiza mediciones y escaneos en la superficie terrestre de dos formas: <b>a) Altimétrico</b> , sensores montados en <b>satélites</b> ( <i>Satelliteborne-Spaceborne Laser Scanning, SLS</i> ); o vehículos <b>aerotransportados</b> ( <i>Airborne Laser Scanning ALS</i> ). <b>b) Vertical o terrestre</b> ( <i>Terrestrial Laser Scanning, TLS</i> ).

Tabla. 2.1 Áreas del LiDAR y sus aplicaciones.

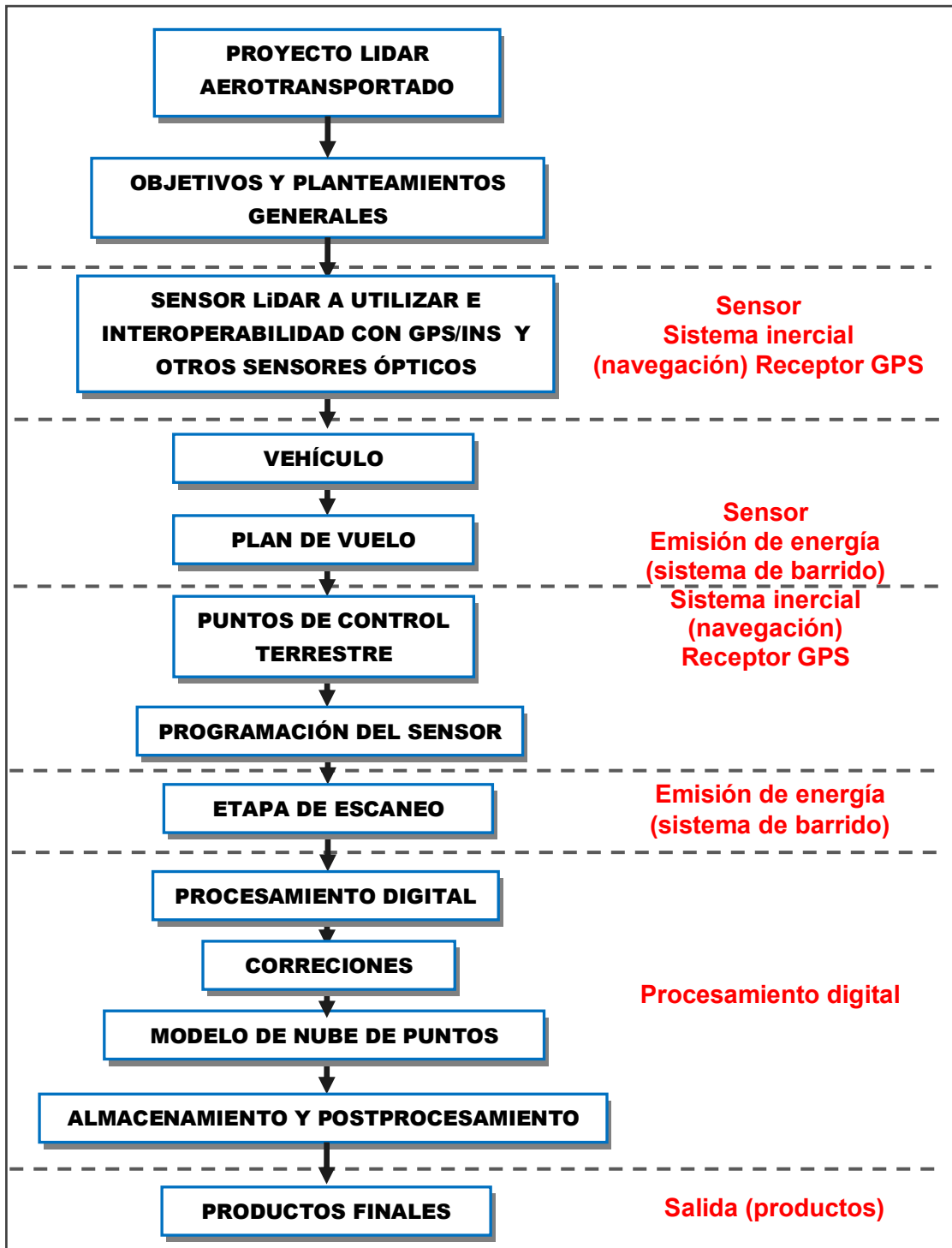


Fig. 2.2 Esquema de proyecto de LiDAR aerotransportado.

Como cualquier proyecto, en el escaneo y procesamiento de datos LiDAR debe estimarse su viabilidad y plantearse objetivos para obtener los resultados esperados (Fig. 2.2).

De este proceso, la delimitación (extensión)<sup>7</sup> y conocimiento de las características físicas de la zona a escanear, permiten estimar el tiempo de escaneo y procesamiento del proyecto, tipo de sensor LiDAR a utilizar, nivel de resolución espacial, precisión y exactitud requerida, productos finales, otros análisis, etc.<sup>8</sup> por este motivo deben considerarse las ventajas y desventajas del LiDAR aerotransportado en el proyecto:

### ***Ventajas***

- **Menor dependencia de condiciones atmosféricas.** El láser como sensor activo permite escanear datos independientemente de las condiciones atmosféricas o de visibilidad reducida.
- **Menor tiempo de captura y procesamiento.** El procesamiento y escaneo de una superficie de 1,000 km<sup>2</sup> puede obtenerse en sólo 24 horas: primeras 12 horas para las correcciones del vuelo y escaneo; y las 12 horas restantes, en la generación del modelo de nube de puntos digital. Este tiempo contrasta con otras geotecnologías, que podrían tardar meses o años procesando la misma superficie (*Burtch, 2002*).
- **Mayor resolución espacial.** El espacio (rango) entre cada punto varía de milímetros a centímetros, modelando un objeto o superficie con gran detalle tridimensional.

### ***Desventajas***

- **Propiedades del láser rojo-infrarrojo.** Las características espectrales de estas longitudes de onda no pueden atravesar los objetos o utilizarse para escanear cuerpos de agua, ya que éstos absorben el impulso láser.
- **Escaneo de discontinuidades (*break lines*).** Ciertos terrenos son difíciles de escanear por las discontinuidades o cambios abruptos que presentan: pendientes escabrosas, cortina de presa, orillas de cuerpos de agua, ciertas líneas de infraestructura, etc., aunque *Yassine et al. (2008)* desarrollaron un método digital para determinar automáticamente dichas discontinuidades.

---

<sup>7</sup> Según la *Remote Sensing Application Center*, para que el escaneo LiDAR sea costeable, el área a escanear debe ser de 1,000 acres en adelante (404.68 Ha o 4.05 Km<sup>2</sup>) (*RSAC, 2008*). La NOAA, estima un costo promedio de \$1,000 a \$2,000 US dólares por milla cuadrada (259 Ha o 2.59 Km<sup>2</sup>) (*NOAA, 2008*), solamente considerando el vuelo, captura de puntos y procesamiento.

<sup>8</sup> El *software* académico LIMULATOR, realiza simulaciones de vuelo y captura de datos de varios sensores comerciales, facilitando la planeación del proyecto LiDAR antes de emprender un fuerte gasto en el vuelo y procesamiento (*Lohani, 2008*).

## 2.2 Descripción de los componentes del LiDAR aerotransportado

El **LiDAR aerotransportado**,<sup>9</sup> es un sistema integrado por varias geotecnologías, dispositivos avanzados y procesos técnicos, destacando:

### 2.2.1 Vehículo

El sensor LiDAR aerotransportado se monta en aviones tripulados (los más utilizados en sensores LiDAR) y no tripulados, helicópteros y globos dirigibles. El sensor LiDAR y otros artefactos complementarios (GPS, sistemas inerciales) son montados en el fuselaje, ala o nariz del avión. Algunos sensores se montan en dispositivos especiales sobre una parte externa de la aeronave. La selección del vehículo aéreo dependerá de los alcances del proyecto y escena a escanear, por ejemplo, los sensores montados en un helicóptero permiten una captura de mayor densidad de datos, aunque su procesamiento digital será mayor que los datos capturados por un avión.

### 2.2.2 Sensor

Es el instrumento que emite los impulsos o de longitudes de onda de láser y en algunos casos, es también receptor de los retornos. Los sensores más comunes son pulso-retorno (*Time of Flight, ToF*) y fase de señal (*Phase-based*).

**Sensor pulso-retorno: (*Time of Flight, ToF*)** También conocido como de tiempo invertido o *pulsed-based scanning*, está integrado por (Fig. 2.3):

1. **Fuente emisor a láser:** el artefacto que emite su propio impulso láser (destello) hacia el objeto.
2. **Tiempo de vuelo del láser:** una vez emitido el impulso, el láser viaja hacia el objeto en tiempo y distancia.
3. **Objeto de interacción:** el objeto que tiene contacto con el láser. Esta interacción es capturada por la computadora y representada digitalmente como un punto.
4. **Tiempo de retorno:** una vez dada la interacción del impulso con el objeto, el láser regresa o retorna en tiempo y distancia (rango) hacia el receptor de retornos. Para el registro de los tiempos de retorno (llamado también rebote o eco).

---

<sup>9</sup> El LiDAR Aerotransportado, *Airborne Laser Scanning ALS*, es también conocido como *Airborne LiDAR Topographic ALT*, *Airborne LiDAR Terrain Mapping System ALTMS* y *Airborne Laser Swath Mapping ALSM*.

**5. Receptor del retorno:** Este receptor recibe el impulso de retorno. Este receptor puede estar integrado en el sensor emisor o ser un receptor independiente.

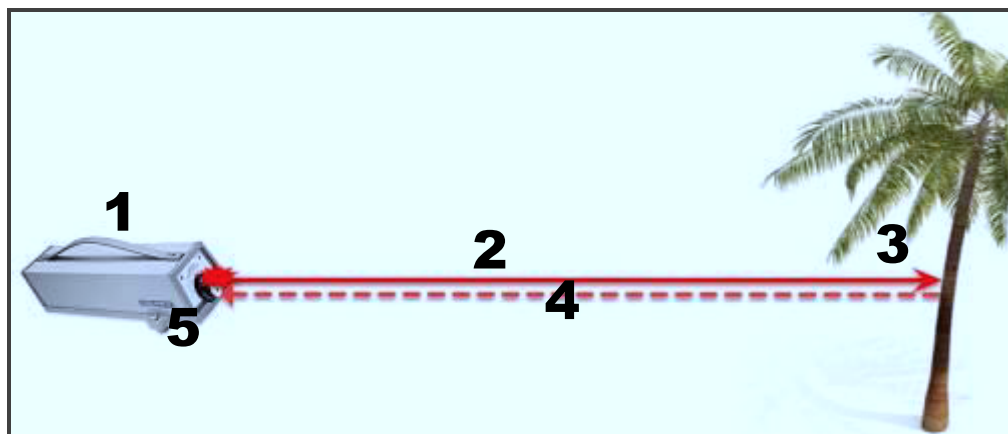


Fig. 2.3 Imagen sistema ToF.

El proceso de escaneo láser se realiza por el cálculo del tiempo de los impulsos enviados desde el sensor hasta el objeto de interacción y el retorno del objeto hacia el sensor de nuevo. Como la distancia está en función del tiempo de impulsos de envío y retorno, la ecuación de la velocidad se emplea en este caso:

$$V = D / T$$

Donde:

*V*, es velocidad

*D*, distancia

*T*, tiempo

Si se despeja la distancia, entonces se obtiene:

$$D = V * T$$

La distancia resulta de multiplicar la velocidad por el tiempo.

En el caso del láser, en la ecuación anterior de la distancia, la velocidad se refiere a la conocida velocidad de la luz, derivando la siguiente expresión:

$$D = r * (T/2)$$

Donde:

*D* = Distancia del sensor hacia el objeto

*r* = velocidad de la luz, expresada como rango de 0.3 metros por nanosegundo.

*T* = Intervalo de tiempo de los impulsos de envío y retorno. Por esta razón, el tiempo está dividido entre 2, ya que el láser tiene que viajar desde el sensor hacia el objeto, y del objeto retornar hacia el detector (Shan y Toth, 2008:4-6).

Aunque el LiDAR y las mediciones láser por estaciones totales, comparten el mismo principio del *ToF*, el LiDAR se diferencia del otro, porque en lugar de medir un punto por segundo, puede medir 50,000 puntos en un segundo, con un rango de 75 m hasta 2 Km, escaneando y dando forma al objeto (*RSAC,2008*). Cabe señalar que no todos los sensores *ToF* pueden capturan en un sólo vuelo todos los retornos, por lo que es necesario realizar dos vuelos para la misma zona. En 2007, la empresa *LeicaGeosystems*, presentó el sensor ALS50-II, el primer sensor de **Pulsos Múltiples** (*Multiple Pulses in Air MPIA*) que permite obtener 150,000 puntos por segundo, gracias a que este sensor envía otro impulso después de haber emitido el primero, obteniendo en un sólo vuelo, de forma instantánea el primer y último retorno, mayor densidad de puntos y detalle del objeto, reduciendo tiempo de escaneo y costos de operación (*Roth y Thompson,2008*).

**Sensor por señal de fase (*Phase-based*)**, (Fig. 2.4) conocido también como de fase o diferencia de fase, integrado por:

- 1. Fuente emisor a láser:** en el escaneo por señal de fase, el artefacto emite una señal continua de radiación láser.
- 2. Señal:** ésta se expresa como una señal con una corta longitud de onda de tipo sinusoidal, continua, amplia, modulada y muy rápida.
- 3. Objeto de interacción:** la longitud de onda de la señal, interacciona con el objeto en una determinada fase y ángulo de incidencia. Debe señalarse que este tipo de escaneo puede ser afectado levemente cuando hay brillo intenso del sol o con un objeto que refleje este brillo directamente, por que se modifica la fase entre el sensor y el objeto (*Wimbush,2008*).
- 4. Distancia sensor - objeto:** la distancia (rango) se calcula por la diferencia de fase, entre la señal emitida y señal reflejada -a diferencia del *ToF* que la calcula por el tiempo de recorrido del impulso-. Generalmente los sistemas *Phase-based* son utilizados en plataformas terrestres (Lasergrametría Terrestre).

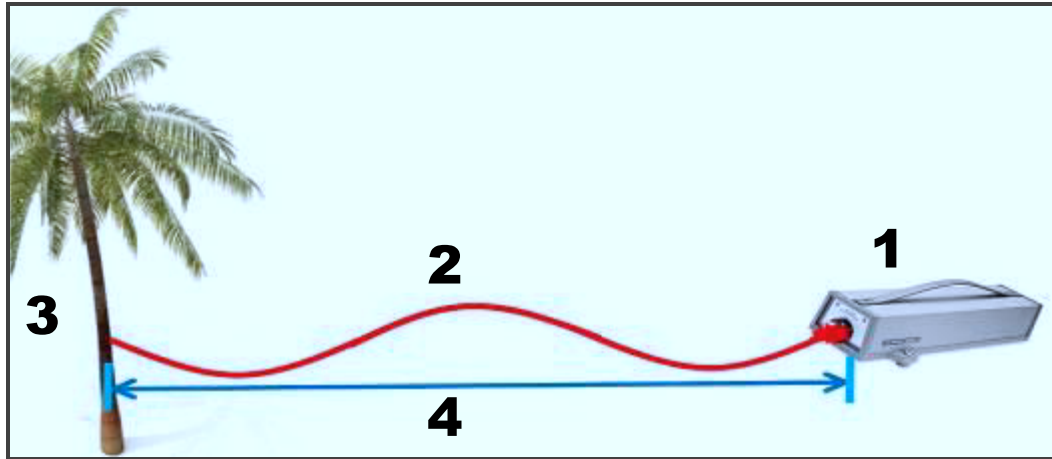


Fig. 2.4 Imagen sistema *Phase-based*.

La decisión entre utilizar un sensor *ToF* o *Phase-based*, dependerá de la escala y detalle del objeto a escanear, ya que el sistema *Phase-based* es 100 veces más rápido que el sistema *ToF*, escaneando en poco tiempo y con mayor detalle (Harrap y Lato, 2008). A pesar de estas importantes ventajas, *Phase-based* presentan inconvenientes frente al *ToF* como rango (alcance más reducido), memoria digital (más pesado) y mayor costo (*Phase-based* \$65,000-\$165,000 US dólares; *ToF* \$31,500-\$150,000) (Fowler et al. 200:215). Para conocer las ventajas entre *ToF* y *Phase-based*, la compañía estadounidense *Midwestern Consulting* comparó dos sensores terrestres fijos (*ToF* y *Phase-based*) en el escaneo de un túnel vehicular durante 4 horas: el *ToF* capturó 300 puntos del túnel en diez escaneadas, mientras que *Phase-based* capturó 1,500 puntos en 25 escaneos, modelando detalles de luminarias encendidas y apagadas del túnel (Wimbush, 2008).

En el anexo, tabla II. **Sensores LiDAR** se muestran las principales características de los sensores aerotransportados y terrestres más utilizados. Algunos de éstos, cuentan con accesorios complementarios (cámaras fotográficas auxiliares y *software* integrado) para los procesos de correcciones, clasificación, calibración, etc. En la tabla III, se presentan los formatos digitales provenientes de sensores comerciales, principalmente de las empresas comerciales *LeicaGeosystems*, *Optech*, *TopoSys* y *RIEGL*.



Por último, el impulso láser utilizado en la mayoría de los sensores tienen ciertas especificaciones de seguridad, de acuerdo a la clasificación de seguridad internacional *IEC60825-1 Standar* para el uso de instrumentos láser. En general, los sensores LiDAR altimétricos y verticales están clasificados como 1 de acuerdo al estándar IEC (Tabla. 2.2) y por lo tanto son seguros al ser humano (*Shan y Toth,2008:21*), aunque se recomienda para evitar la incidencia en los ojos de una persona.

CLASE	CARACTERÍSTICAS DEL LÁSER
1	Es seguro en cualquier condición normal, pero no debe exponerse prolongadamente.
1M	Es seguro en cualquier condición normal, pero el rayo láser no puede ser ampliado a través de instrumentos ópticos como microscopios y telescopios.
2	Un nivel seguro, pero no debe de exponerse el ojo humano más de 0.25 segundos. La gran mayoría de los apuntadores laser tiene este nivel.
2M	Es un nivel seguro, aunque no debe ser ampliado por instrumentos ópticos ni verse directamente a los ojos por cierto tiempo.
3R	En este nivel, se considera seguro si se maneja adecuadamente. No se recomienda el contacto directamente con los ojos.
3B	Este nivel de láser es peligroso si se expone directamente hacia el ojo humano. Se requiere de lentes protectores especiales.
4	Laser con alta radiación. Pueden causar quemaduras graves e incendios. No puede estar en contacto con el ojo o piel humana, ya que puede causar quemaduras con daños permanentes. Láseres de tipo industrial, científico y médico se consideran en esta categoría.

**Tabla. 2.2** Niveles de seguridad láser *IEC 60825-1 Standar*. Fuente: CALTECH,1998.

### 2.2.3 Emisión de energía (sistema de barrido)

En este proceso se configura digitalmente en el sensor *ToF* los rangos (espacios) entre cada punto de interacción láser-objeto, y pueden variar desde 2 mm hasta 10 m, dependiendo de los impulsos láser generados por segundo. Cada segundo de escaneo *ToF* puede captar de 10,000 puntos (10kHz) a 50,000 (50kHz) puntos, generando un patrón de densidad de puntos durante el vuelo. El ancho del barrido varía entre 20° a 30°, ya que ángulos mayores a éste último, no son empleados a grandes altitudes, porque provocan errores y distorsiones en las orillas del barrido (*Burtch,2002*), por ello algunos sensores cuentan con espejos rotatorios o fibra óptica, que distribuye los impulsos láser hacia el objeto de interacción, generando la densidad de puntos expresados en **patrones de barrido** (Tabla. 2.3)

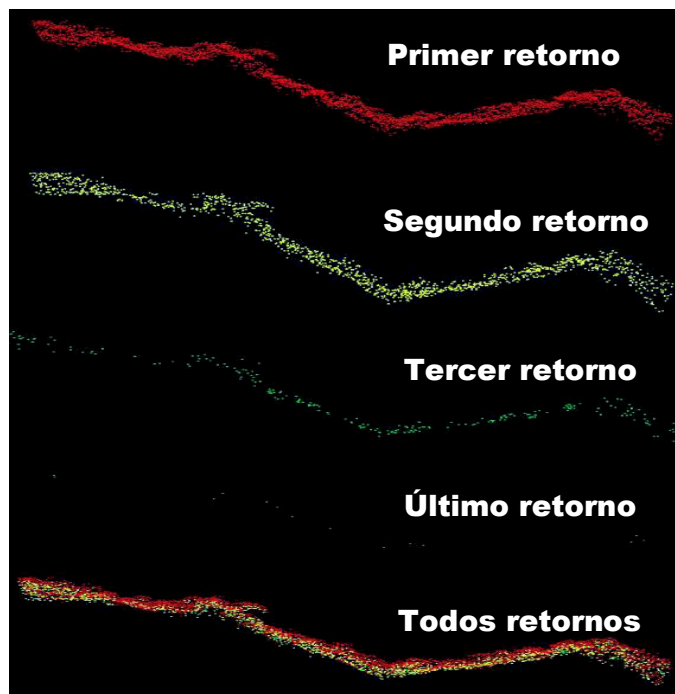
PATRÓN DE BARRIDO	CARACTERÍSTICAS
<i>Zigzag</i>	Un espejo oscilatorio junto con un galvanómetro direcciona el pulso láser haciendo más uniforme el barrido. Este es el patrón más utilizado por los sensores comerciales.
<i>Sinusoidal</i>	También conocido como de tipo meandro, utiliza un espejo parecido al patrón zigzag, que es también muy utilizado por los sensores comerciales.
<i>Líneas paralelas</i>	Usa un espejo poligonal que direcciona el pulso láser a lo largo de líneas paralelas del barrido. Una de las ventajas es la uniformidad de los puntos a lo largo del barrido.
<i>Elípticas</i>	Este patrón es generado a través de un espejo rotatorio o un espejo nutatorio (Escáner Palmer) que gira sobre su propio eje junto con la inclinación del avión. Ejemplos de espejos rotatorios están: poligonal, piramidal, de prisma, inclinado y de un lado.
<i>TopoSys</i>	Este patrón fue desarrollado por la empresa alemana Toposys. Este sensor, a diferencia de los anteriores, emite los impulsos y recibe los retornos a través de fibra óptica. La ventaja del Toposys es que los pulsos lineales y sinusoidales son paralelos, uniformes y espaciados durante el escaneo.

**Tabla. 2.3** Patrones de barrido.

Todos los patrones de barrido y densidad de los puntos son afectados en mayor o menor medida por la geometría misma del patrón, las características físicas del objeto de interacción, frecuencia de pulsos ángulo de oscilación del espejo, altura, dirección, velocidad y aceleración del avión. Todas estas distorsiones tienen que ser corregidas por procedimientos técnicos-computacionales para obtener el modelo de nube de puntos correcto.

La **intensidad** (Fig. 2.5) está relacionada con los retornos, ya que ésta mide cuanta energía es reflejada desde el objeto de interacción, permitiendo el análisis, discriminación y clasificación de las características y componentes del objeto escaneado.

Debido a la correlación entre el tipo de material del objeto de interacción y la intensidad del impulso láser, es posible conocer las propiedades espectrales de los objetos: cuerpos con gran reflectividad (techos metálicos), mostrarán un alto retorno del impulso a diferencia de una carretera pavimentada, porque éste absorbe parte de la energía láser. Las superficies sólidas como edificios o suelo, los retornos se reflejan inmediatamente, mientras que objetos como agua y vidrio, generan reflexión especular (dispersión), provocando que el reflejo no retorne al sensor y no se generen datos.



**Fig. 2.5** Imágenes de retornos LiDAR en un dosel forestal.  
Fuente: INEGI,2007.

#### 2.2.4 Sistema inercial

Como el vehículo aéreo que contiene el sensor está sujeto a movimientos atmosféricos (vientos o presión), siempre se generan errores durante el escaneo y en la recepción de la señal del GPS. Para ello, son utilizados giroscopios y acelerómetros que integran el **INS** (*Inertial Guidance System*), que mide los siguientes movimientos:

- a) **Cabeceo** (*roll*). Conocido como eje X, (transversal o lateral), este movimiento mide la inclinación del avión de ala a ala. En Fotogrametría es conocido como ángulo de rotación W.
- b) **Alabeo o balance** (*pitch*). Eje Y, (longitudinal u horizontal) es perpendicular y horizontal con respecto a X, mide la rotación vertical de la nariz a la cola del avión. En Fotogrametría se le conoce como ángulo de rotación J.
- c) **Deriva o guiñada** (*yaw, heading*). Eje Z, (vertical), es perpendicular y vertical a X, mide la rotación vertical del avión (movimientos derecha-izquierda de la punta del avión). Se le conoce como ángulo de rotación K en Fotogrametría.

Los anteriores movimientos se miden en unidades de ángulos de inclinaciones, aceleraciones y rotaciones, mediante el **IMU** (*Inertial Measurement Unit*) que permiten la corrección de errores producidos por la nave.

### 2.2.5 Receptor GPS

Todo punto LiDAR cuenta con coordenadas (longitud X, latitud Y, altura Z) georreferenciado en una proyección geodésica, gracias al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), sistema compuesto por 27 satélites que orbitan el planeta, emitiendo señales hacia receptores terrestres y por medio del proceso de triangulación, estiman la posición exacta. Todo sensor LiDAR cuenta con un receptor de señales transmitidas por la constelación GPS. Además de contar con el receptor GPS, el escaneo debe operar con mínimo tres estaciones base GPS en el terreno (puntos de control), donde reciben señales de los satélites. Los puntos de control se establecen en zonas planas y despejadas en la zona a escanear. Con el sensor GPS y los puntos de control, es posible corregir y georreferenciar los puntos que modelan la zona escaneada. En nuestro país, las estaciones base operan simultáneamente con la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI (Legarrea, 2005).

### 2.2.6 Procesamiento digital

Importante etapa donde se procesan, depuran y corrigen errores en los datos crudos obtenidos por medio de los sistemas inerciales IMU y receptores GPS en el avión y puntos de control en campo. Esta etapa puede consumir del 80 al 85% del tiempo del total del proyecto y al final de éste se obtienen los puntos escaneados de forma vectorial-tridimensional georreferenciados de la zona, dando forma al **modelo digital de nube de puntos** (*Cloud Point*) (Harrap y Lato, 2008).

#### 2.2.6.1 Correcciones

**a) Ruido.** Los datos crudos de LiDAR pueden presentar dos tipos de ruido: *variables* (altura del vuelo, ángulo nadir, características del terreno y reflectancia de los objetos) y *constantes* (determinación del rango, posición y orientación, sincronización del sensor) para mitigar el ruido se realizan realces en ciertos puntos del modelo LiDAR.

**b) Precisión y exactitud.** Como la mayoría de los errores se deben a la altura del vuelo (por ejemplo a menores alturas hay más densidad y espaciado de puntos) y las características físicas y reflectivas de los objetos, debe realizarse correcciones geodésicas que permitan obtener una adecuada precisión y exactitud, obteniendo una máxima precisión RMSE vertical de 10 cm y horizontal de 5 cm, dependiendo del sensor GPS (Fowler et al. 2007:215). En caso que se requiera de mayor precisión y exactitud

topográfica, el modelo aerotransportado tiene que complementarse con un modelo de la misma zona obtenido por un sensor LiDAR terrestre (Lohani,2008).

**c) Geométricos-georreferencia** Esta corrección es muy importante para que el modelo digital represente lo más posible al terreno. La corrección geométrica busca la relación correcta entre un punto LiDAR y su correspondiente coordenada geodésica. Aunque algunos sensores integran la proyección geodésica UTM al momento del escaneo gracias al GPS, hay sensores que manejan sus propias referencias geográficas que tienen que ser reproyectadas a UTM. Sin importar que los sensores integren UTM, es necesario verificar la proyección mediante el ángulo del sensor, IMU, puntos de control de campo, Modelos Digitales de Elevación u ortofotos (vuelos fotogramétricos y satelitales) para buscar áreas de coincidencias geodésicas.

Todas estas correcciones de modelos LIDAR aerotransportados, requieren de la intervención de equipos interdisciplinarios con varios especialistas (p.e. geodestas, fotogrametristas, topógrafos, analistas en SIG) para generar modelos y realizar los análisis espaciales requeridos por el usuario. En el caso del LiDAR aerotransportado, la etapa de correcciones puede consumir el 85% del tiempo total del proyecto LiDAR, mientras que el proceso de planeación y la captura de datos consumen aproximadamente el 15% (Fowler et al. 2007:221).

#### **2.2.6.2 Almacenamiento de datos (modelo de nube de puntos)**

Una vez realizadas las correcciones, se obtiene un modelo de nube de puntos digital completo o en partes (**mosaicos de nubes de puntos**) que permite un sencillo manejo digital y procesar sólo algunas partes del modelo.

En la actualidad existen **dos problemas** con la **operación digital** de los modelos de nubes de puntos:

El *primero*, es que algunos modelos están compuestos de millones de puntos (en algunos casos pueden pesar más de 1 terabyte TB), necesitando gran **espacio digital** para su procesamiento. En general, los datos brutos LiDAR son más pesados que la nube de puntos o los productos finales postprocesados.

El *segundo* problema es que no existe **un único software** que permita realizar todos los procesos (desde la captura, postprocesamiento, correcciones, análisis u obtención de productos finales), por ello es necesaria la utilización de varias herramientas en cada paso, lo cual resalta la importancia de la interoperabilidad entre los datos digitales. Este

problema de interoperabilidad se debe en parte al rápido desarrollo de *softwares* comerciales y académicos, cada uno de éstos con sus propios formatos.

La **tabla III. Formatos digitales de modelos LiDAR** del **anexo**, se presentan algunos formatos digitales más utilizados en el procesamiento de datos LiDAR, mostrando la variedad de formatos que no permitían la interoperabilidad entre sensores, datos y *software*. Por ello a principios de la década de 2000, las agencias federales estadounidenses FEMA y USGS realizaron la primera cartografía LiDAR en código ASCII<sup>10</sup> (McGaughey,2007:107). Con el tiempo, este formato se volvió interoperable entre varias agencias públicas y académicas. Por ello, la *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS*, creó el comité de LiDAR (*ASPRS LiDAR Committee*) para negociar y concretar un formato estándar general y en 2003 presentó la extensión estándar .LAS 1.0 (*LASer File Format Exchange*) diseñado en código ASCII para facilitar la interoperabilidad entre sistemas comerciales, académicos y públicos de EU (Samberg,2007).

X	Y	Elevation	Intensity	Pulse	Return	ReturnsPerPulse	ScanAngle
464314.190000	1923742.170000	277.649994	0.000000	598538	3	4	4.000000
464308.620000	1923742.750000	289.820007	64.000000	598538	1	4	4.000000
464309.110000	1923742.690000	285.070007	3.000000	598538	2	4	4.000000

**Tabla. 2.4** Columnas y filas de un archivo.LAS visualizado en el *Software* FUSION.

En general un archivo .LAS, además de representar un punto digital, contiene una tabla de datos numéricos (decimales) con la siguiente información:

- i. **X, Y, Z.** Coordenadas referidas en un sistema de proyección geodésica (longitud, latitud, altitud) del punto pulso-retorno láser. En algunos sistemas, este punto se representa en forma 2.5D (la elevación Z es está en función de X Y), o 3D (donde Z es variable independiente de XY).
- ii. **Intensity (Intensidad).** Representan valores de la intensidad del impulso-retorno del punto, que varía de acuerdo a las características y propiedades físicas de los objetos de interacción.
- iii. **Pulse number (Pulso).** El pulso láser emitido desde el sensor, medido en miles de impulsos por segundos (kHz).

<sup>10</sup> ASCII (*Code for Information Interchange*) es un código de caracteres del alfabeto latino que permite la interoperabilidad entre varios sistemas y requerir poco espacio virtual.

- iv. **Return number (Número de retorno).** Los números de pulsos (primero, segundo, tercero y último) obtenidos durante el escaneo.
- v. **Nadir angle / Scan angle.** También conocido como ángulo Nadir, de escaneo o barrido, son los grados de posición del sensor montado en el avión, en relación directamente hacia abajo. Con este ángulo se calcula el ancho del barrido.
- vi. **Return per pulse / Values per return / given pulse.** Dependiendo del sensor, se puede cuantificar la frecuencia de repetición de los impulsos y retornos, obteniendo retornos por cada impulso o valores totales por cada retorno.
- vii. **RGB / NIR.** Algunos sensores, además de detectar el impulso-retorno láser, integran datos de sensores ópticos en el mismo momento de escaneo. Los archivos .LAS de estos sensores tienen una columna con valores digitales de colores visibles RGB -(rojo, verde y azul); NIR (Infrarrojo Cercano) o CIR (NIR, R, G Infrarrojo Cercano, rojo y azul).

En los formatos más recientes, existen otros datos numéricos como **classification**;<sup>11</sup> **user data** (nombre del usuario); **edge of flight line** (el punto al borde del área del vuelo); **direction of scan flag** (dirección del espejo durante el vuelo); **GPS time** (valor del tiempo de captura GPS), entre otros. En general, todos los datos están contenidos en los metadatos del *header* o encabezado del archivo .LAS donde se incluyen otros datos técnicos, fecha de captura (día juliano), nombre del sensor utilizado, etc.

### 2.2.6.3 Softwares de procesamiento

Los *softwares* de procesamiento LiDAR pueden clasificarse en tres categorías:

- i. **Captura:** cuando se captura el pulso-retorno, un *software* lo almacena digitalmente en el sensor y permite que dichos datos se exporten a otras herramientas. Algunas veces este mismo *software* permite observar los datos captados (2D, 2.5D o 3D) o importar también datos de otros sensores.
- ii. **Procesar:** Permiten trabajar directamente los datos por las siguientes funciones: corregir, cortar, transformar, exportar, reducir tamaño digital, etc.

---

<sup>11</sup> La ASPRS tiene la siguiente clasificación por puntos dependiendo del objeto de interacción: (0,1) sin clasificación; (2) suelo o *Ground Returns* GR; (3) baja vegetación o *Low Vegetation Returns* LVR; (4) vegetación media o *Medium Vegetation Returns* MVR; (5) vegetación alta o *High Vegetation Returns* HVR; (6) construcción. La integración de todos estos retornos configuran al modelo de nube de puntos.

**iii. Analizar:** obtener información cuantitativa de los datos (p.e. segmentar, clasificar, filtrar, fusionar) que permitan obtener los modelos digitales que pueden enviarse a otros programas con fines ilustrativos, demostrativos, aplicativos, etc.

En el mercado existen aproximadamente 500 *softwares* (incluidas extensiones) que permiten trabajar los puntos LiDAR en formato .LAS u otros de base ASCII (Samberg, 2007). En el **anexo**, la **tabla IV. Softwares de procesamiento LiDAR**, se muestran algunos *softwares* comerciales, extensiones comerciales y *freewares* académicos más utilizados en el procesamiento de modelos LiDAR aerotransportados y terrestres, aunque no todos los formatos/*softwares* utilizados en sensores altimétricos son compatibles u operables con los sensores terrestres, por que los altimétricos operan de forma parecida a un SIG, mientras los terrestres, son más parecidos a los programas topográficos y constructivos (p.e. CAD 3D).

### 2.2.7 Salida (productos)

Una vez procesados los datos LiDAR del área escaneada, a través de varios *softwares*, se obtiene finalmente el modelo de nube de puntos que representa el área escaneada. Estos productos pueden clasificarse en los siguientes modelos digitales (Fig. 2.6):

- **Elevación** (*Digital Elevation Model DEM – Digital Terrain Model DTM*). Un MDE representa todo lo que hay en un área, sean elementos naturales (accidentes topográficos, vegetación, cuerpos de agua, etc.) o antrópicos (construcciones, caminos, asentamientos humanos, infraestructura, campos de cultivo, etc.) de la zona modelada.
- **Suelo desnudo** (*Bare Earth Model BEM*), representa solamente el terreno topográfico sin ningún elemento antrópico (construcción) o vegetación.
- **Forestal** (*Digital Canopy Model DCM*) que representa el dosel forestal.
- **Construcciones o Edificaciones** (*Digital Building Model DBM*) que representa modelos urbanos, construcciones e infraestructura, edificios históricos y patrimoniales, ruinas arqueológicas.
- Por último, existen **otros modelos digitales** de gran detalle, cuya aplicación no encuadran dentro de las anteriores categorías: escenas del crimen 3D, instalaciones industriales.



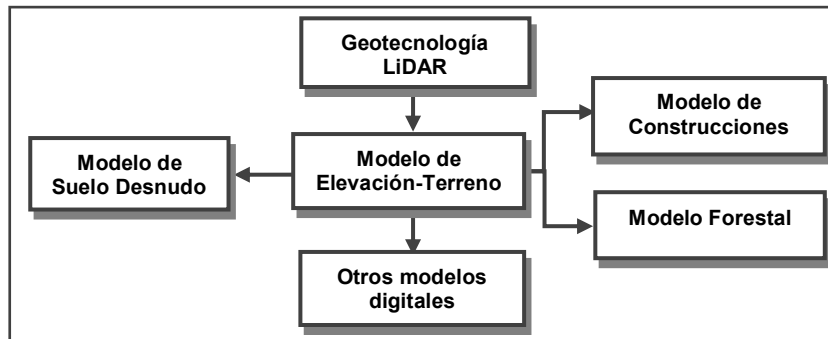


Fig. 2.6 Esquema de modelos digitales a partir del LiDAR.

A partir de la nube de puntos se pueden realizar los análisis geoespaciales requeridos por el analista, (p.e. clasificar o filtrar los puntos por elevación, intensidad o retornos) dependiendo de las aplicaciones y objetivos de cada disciplina científica. Con estos modelos digitales, el LiDAR permite a la Geomática una *mejor relación y comunicación con otras disciplinas*:

- i. *Disciplinas espaciales que manejan otros tipos de espacios no geográficos, pero inmersos dentro de éste*: Psicología, Arquitectura, Urbanismo, Minería, Geología, Arqueología.
- ii. *Disciplinas con débil, escasa o nula interacción con la Geomática y Geociencias y que por primera vez incursionan en la espacialidad gracias al LiDAR*, p.e. ingeniería industrial y criminalística, las cuales necesitan de técnicas y conceptos geomáticos para aprovechar sus aplicaciones emergentes, por ejemplo, extracción de características en escenas del crimen o detalles milimétricos en instalaciones industriales. (Véase la **tabla I. Aplicaciones del LiDAR en disciplinas del anexo**).

Una vez procesados las nubes de puntos procesados en modelos digitales, éstos se pueden exportar en otros formatos vectoriales (p.e. TIN, *Arcshape*, KML o DXF); figuras geométricas como vóxels<sup>12</sup> o Puntos de Color (*Point of Color*) o Puntos-Pixeles (integración de puntos LiDAR con pixeles de imágenes aéreas o satelitales). La elección de exportar en otros formatos o fusionarlos con otros datos de sensores dependerá del grado de resolución y visualización requerida del proyecto: p.e la representación de complejas instalaciones (refinería), necesita de una modelación milimétrica; mientras que un modelo urbano, solamente se exportan las edificaciones en volúmenes cúbicos.

<sup>12</sup> Un vóxel, acrónimo inglés de "*Volumetric Pixel*", es un modelo digital tridimensional conformado por una malla de matrices cúbicas. Un vóxel es análogo a un pixel 2D, por ser la unidad mínima de información en fotografía digital, cuya diferencia es que éste es la unidad mínima volumétrica.

### 3. PROPUESTA METODOLÓGICA

Una vez conocidas las características técnicas del LiDAR aerotransportado, en este capítulo se trabaja una propuesta metodológica de fusión de datos LiDAR aerotransportados e imágenes multiespectrales por medio del algoritmo *Máquinas de Soporte Vectorial SVM*. Esta propuesta aplica y aporta conocimiento metodológico a la Percepción Remota y la Geomática, al mejorar una técnica de obtención de información geoespacial.

#### 3.1 Contexto de investigación

En esta tesis se utiliza un método de fusión basado en **Máquinas de Soporte Vectoriales (SVM Support Vector Machine)**, algoritmo de aprendizaje supervisado aplicado en problemas complejos de clasificación, separación y regresión matemática computacional. Desde la década de los setenta, las SVM son utilizadas en diversas áreas como computación (Inteligencia Artificial y redes sociales en Web 2.0), biometría, renderizado digital, reconocimiento de escritura, identificación de voz, análisis de comportamientos financieros, optimización, sismología, análisis estructural de edificios, análisis de series temporales, química orgánica, resonancia magnética, neurología, etc. (Segaran,2007:216).

En el área de **Percepción Remota**, la utilización de SVM es un área de investigación y desarrollo actual, principalmente en la clasificación de imágenes raster. Bruzzone, et al. (2004) clasifica imágenes hiperespectrales por SVM, evidenciando y validando la efectividad de SVM frente a otros métodos de clasificación estadística tradicionales (*Maximum Likelihood, Isodata, K-Mean, Gaussian Maximun Likelihood*, etc.) como lo comprueban (Shakeel,2008; Tzotsos y Argialas, 2008; Huang et al. 2008).<sup>13</sup> Destacan también trabajos de fusión y clasificación LiDAR e imágenes satelitales por SVM de (Lodha et al. 2006; Salah y Trinder,2007; Gidudu et al. 2007) quienes resaltan también la efectividad de este algoritmo.

Por estas referencias, **SVM es considerado actualmente como uno de los algoritmos más robustos de clasificación**, inclusive sobre las Redes Neuronales

---

<sup>13</sup> Este último trabajo compara la alta precisión de la clasificación de SVM (85%-92%) frente a otros algoritmos comúnmente aplicados en Percepción Remota: *Decision Tree* (80%-90%), *Bayesian* (70%-88%) y *Maximun Likelihood* (60%-86%).

Artificiales (*Cristianini y Shawe-Taylor, 2000; Segaran, 2007*), ya que SVM minimiza *overtting* o sobreaprendizaje y el tiempo del proceso de entrenamiento, porque se depende más de la capacidad del clasificador SVM que de la dimensionalidad de los datos de entrada (todos los puntos necesarios para separar clases). Finalmente existen aplicaciones de algoritmos híbridos entre SVM con autómatas celulares (*Yang et al. 2008*), modelos de Markov (*Hidden Markov Tree HMT*) (*El-Khoribi, 2008*), modelos lagrangianos (*Zhu y Yang, 2008*), Redes Neuronales Artificiales (*Dixon y Candade, 2008*), entre otros.

Como en esta tesis se experimenta con fusión de LiDAR e imágenes multiespectrales mediante *Máquinas de Soporte Vectorial SVM*, se analizan y comparan tres artículos científicos que realizan esta metodología:

i. **Vernon (2008)**, realiza una clasificación de especies arbóreas a partir de datos SPOT-5 y modelos LiDAR en *Sulphur River*, norte de Texas. Se rasterizó el modelo LiDAR (resolución 2.29 m) y se le aplicó un filtro de suavidad para reducir el ruido. Las imágenes fueron corregidas radiométrica y geométricamente y luego transformadas a IHS (*Intensity-Hue-Saturation*) ampliando su resolución de 10 m a 2.5 m. Con esta nueva resolución, se extrajeron el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y el *SWIR Texture Variance*, para distinguir algunos rasgos. La clasificación de estos rasgos y de los modelos LiDAR se realizó por el algoritmo estadístico supervisado de *Mahalanobis* (clasificador de mínima distancia), obteniendo 7 clases (pasto y agricultura; cuerpos de agua, pantano, urbano, suelo desnudo, *fagus* de tierras bajas y *fagus* de tierras altas). La clasificación tuvo una precisión total de 84.46% y un índice Kappa de 0.8166.

ii. **Ali et al. (2008)** realizan un estudio de clasificación y mediciones (altura, volumen) de eucaliptos a partir de datos LiDAR e imágenes fotogramétricas multiespectrales (RGB IR) en una zona de Nueva Gales del Sur, Australia. Al rasterizar el modelo LiDAR se agrupó rasgos por *watershed* (cuencas) y se les aplicó un modelo de textura para reducirles el ruido. Las imágenes se corrigieron radiométrica y geométricamente y se les aplicó un filtro de convolución para reducir las sombras de los árboles y exceso de brillo solar en las copas forestales. Con estas imágenes corregidas se generó la transformación por componentes principales de *brightness, redness, greenness, y blue-yellowness*, para cada banda. De la imagen multiespectral se seleccionaron sitios de entrenamiento que se corrieron por medio del clasificador estadístico supervisado *Maximum Likelihood*,

obteniendo tres clases de eucalipto (*Black Box*, *River Red Gum* y *Grey Box*). Para la validación se escogieron 6 puntos muestra, donde se realizaron correlaciones entre la altura del árbol contra tamaño de la copa, obteniendo una precisión total del 86%.

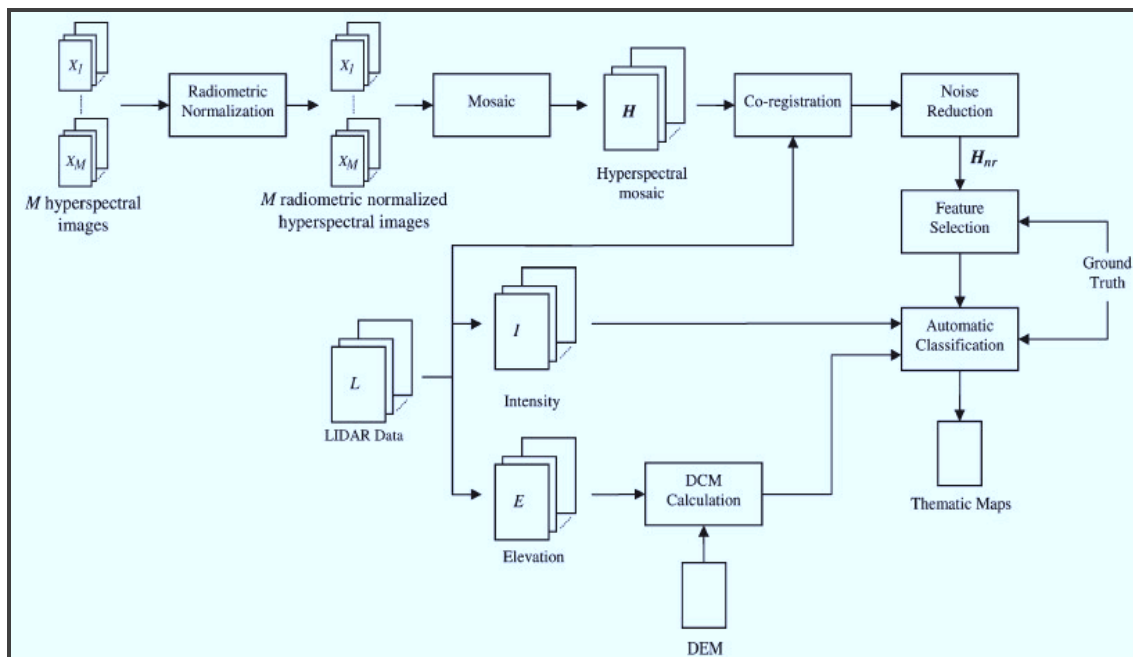
iii. **Bruzzone et al. (2008)** realizan un inventario de 23 especies forestales en Mantua, Italia, utilizando LiDAR e imágenes hiperespectrales aerotransportadas (126 bandas) con 1 m de resolución espacial. Las imágenes fueron corregidas radiométrica y geoméricamente, mientras los datos LiDAR se rasterizaron y obtuvieron mallas de *Canopy Digital Model* (primer retorno) para elevación e intensidad, que posteriormente se les redujo el ruido (Fig. 3.2). La fusión-clasificación de las mallas y las 126 bandas se realizó por SVM gaussiano. Para comprobar su efectividad, fue comparado contra los algoritmos *k*-NN y GML-LOOC.<sup>14</sup> De esta comparación, SVM gaussiano resulto ser el más exacto y preciso en la clasificación forestal que los anteriores y la precisión y exactitud aumenta si se considera en la clasificación los modelos LiDAR de elevación e intensidad. Al final de estas pruebas, se identificaron y clasificaron 19 de 20 especies forestales del sitio, obteniendo un resultado satisfactorio de 90% de aciertos en la clasificación forestal, demostrando la eficiencia de SVM.

Comparando los tres artículos anteriores y en base a los insumos LiDAR y SPOT, se utilizará el clasificador SVM lineal siguiendo la **metodología de Bruzzone** (Fig. 3.1) en la propuesta experimental de esta tesis. *Bruzzone*, realiza preprocesamiento de las imágenes fotogramétricas (*M hyperspectral images*, *Radiometric Normalization*, *Co-registration*) y datos LiDAR (*LiDAR Data*, *Intensity*, *Elevation*, *DCM Calculation*, *DEM*). Una diferencia en esta tesis con respecto a *Bruzzone et al.*, es que los modelos de primer retorno (dosel) y último retorno (línea del suelo), se extrajo de forma indirecta de los datos originales LiDAR, mientras las dos mallas raster fueron obtenidas de forma directa de los datos gracias al *freeware FUSION/LVD*.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> *k*-Nearest Neighbor (*k*-NN) es un método de clasificación supervisada no paramétrica, que no hace ninguna suposición distribucional *a priori* de las variables, sino *a posteriori* del conjunto de datos. *Gaussian Maximum Likelihood with Leave One-Out-Covariance* (GML-LOOC) es un algoritmo paramétrico efectivo en un espacio de alta dimensionalidad siempre y cuando los sitios de entrenamiento cuenten con un radio o margen amplio en el espacio de características. Para ampliar este radio o margen se estima una matriz de covarianza, que permiten ampliar el rendimiento de los sitios de entrenamiento al aumentar la dimensionalidad.

<sup>15</sup> FUSION/LVD fue desarrollado por la *Remote Sensing Application Center* RSAC, perteneciente al *Forest Service* del gobierno federal de EU. Este *freeware* tiene ventajas frente a otros *softwares* y extensiones analizados como *PCI Geomatics LiDAR Engine 1.0*, principalmente su orientación forestal, que permite obtener un *Digital Canopy Model* DCM de forma automática (*McGaughey, 2007*).



**Fig. 3.1** Esquema de la metodología de fusión-clasificación de puntos LiDAR e imágenes hiperespectrales (Bruzzone et al. 2008).

En el método de Bruzzone al igual que en esta tesis, **no se considera la corrección radiométrica de los modelos LiDAR**, ya que el estudio de calibradores radiométricos en intensidad LiDAR **continúa en proceso de investigación**. Shaker y Yan (2010) han mostrado que su propuesta de calibrador radiométrico mejora las imágenes de intensidad LiDAR Para trabajos posteriores en clasificación con imágenes de intensidad LiDAR, debe considerarse la corrección radiométrica.

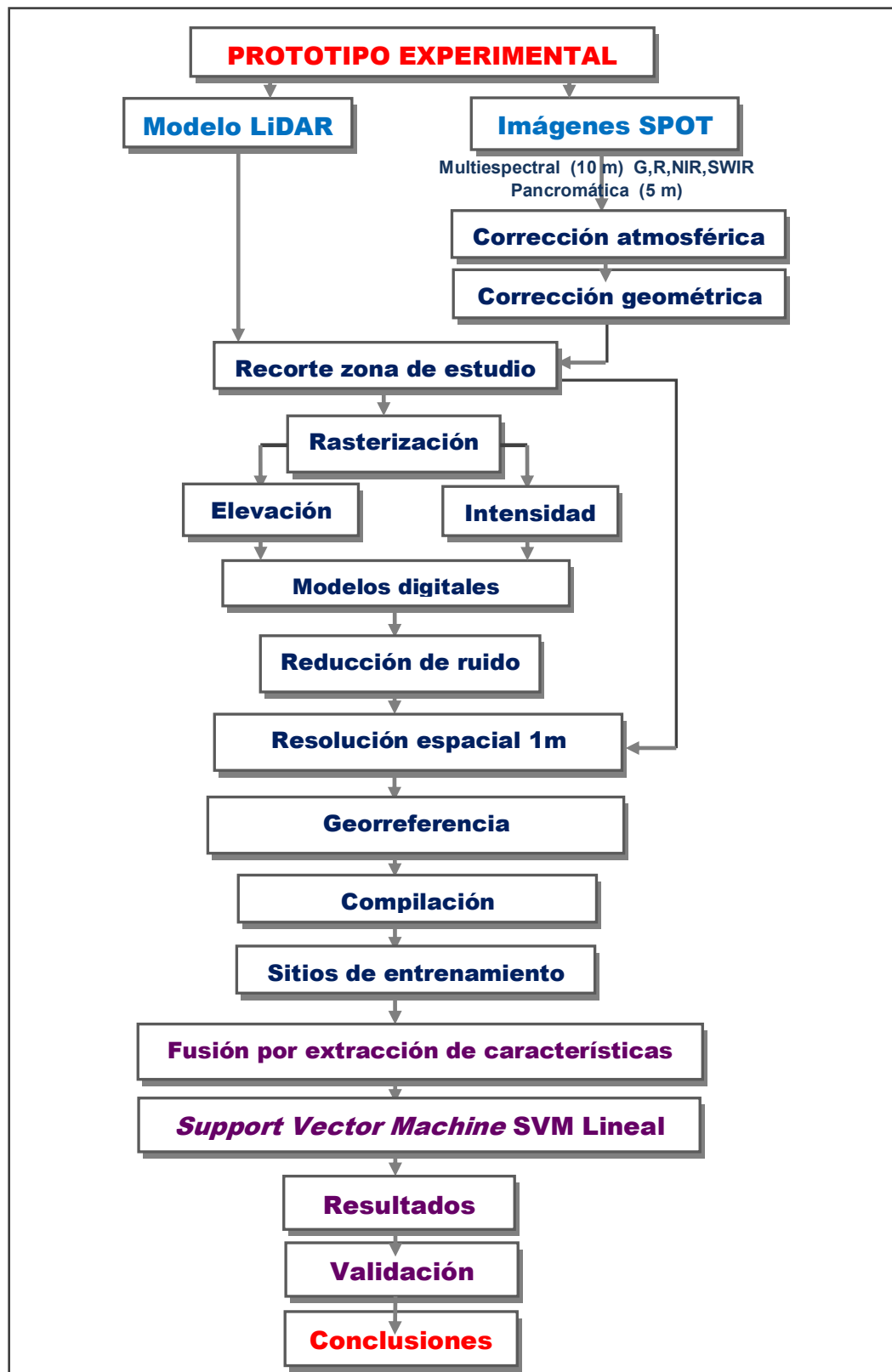
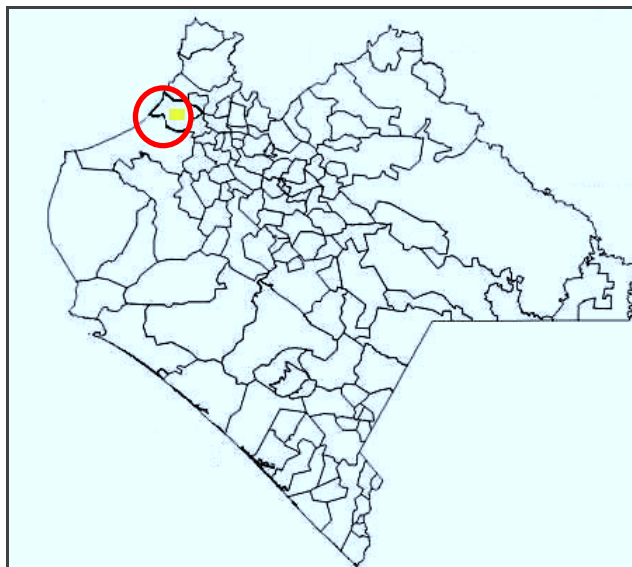


Fig. 3.2 Esquema de la propuesta de la propuesta metodológica experimental.

La anterior Fig. 3.2 muestra los niveles de procesamiento requeridos para las imágenes satelitales SPOT y modelo de nube de puntos LiDAR antes de realizar la fusión por SVM lineal. El objetivo de este procesamiento es obtener las características territoriales (usos del suelo) de la zona de Ostuacán, dicho proceso metodológico se explica a lo largo del capítulo 3.

### 3.1.1 Datos y sitio de estudio

La zona de estudio donde se obtuvieron los datos LiDAR e imágenes satelitales, es un área perteneciente al municipio de Ostuacán, Chiapas (Fig. 3.3) y tiene una superficie aproximada de 4.5 km<sup>2</sup> con características rurales, clima húmedo-tropical y vegetación selvática. Esta área fue elegida por dos razones principales: i) facilitar el procesamiento de los datos, y ii) presentar diversidad territorial, p.e. asentamientos humanos (cabecera municipal de Ostuacán), infraestructura, campos de cultivo y ganaderos, huertos, selva virgen, cuerpos de agua, suelo desnudo, etc., los cuales son características relevantes para la clasificación.



**Fig. 3.3** Ubicación de la zona de estudio.

### 3.1.1.1 Nube de puntos LiDAR

En México, el INEGI es una de las pocas instituciones que procesa y genera modelos LiDAR aerotransportados, mediante un sensor ALS40 *LeicaGeosystems* (integrado por sistema de navegación INS, antena receptora GPS, espejo oscilatorio para barrido láser y cámara digital). Dicho sensor es utilizado en diversas aplicaciones, dependiendo de la altura de la aeronave al momento de la captura (*Chávez,2008*) (Tabla. 3.1).

Altura de vuelo y ángulo de barrido	Aplicaciones del INEGI
1,000 m o menos a 25°	Zonas susceptibles a desastres naturales, líneas eléctricas, vías de comunicación, corredores urbanos, zonas arqueológicas.
3,000 m a 45°	Zonas costeras, bosques.
6,000 m a 65°	Cobertura de zonas extensas (4,000 Km <sup>2</sup> ), zonas montañosas, llanuras.

Tabla. 3.1 Aplicaciones del sensor ALS40 (*Arellano et al. 2005*).

La Nube de puntos del Polígono de inundación del Río Grijalva - Presa Peñitas de diciembre 2007 (LDR071222\_221716\_1.LAS) fue levantado a petición de las autoridades federales como auxiliar en estudios de las inundaciones de Tabasco y el deslizamiento de tierra del 5 de noviembre de 2007 sobre el Río Grijalva.

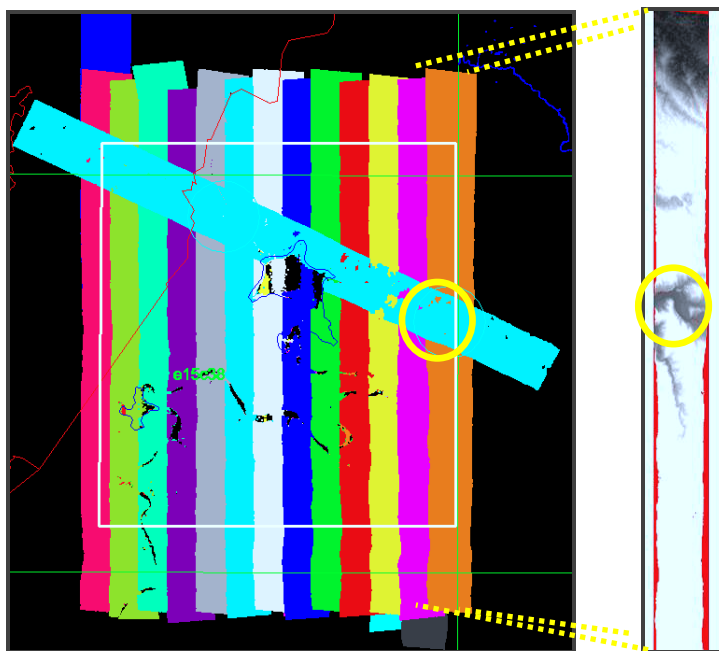


Fig. 3.4 Imágenes de líneas de vuelo-cobertura LiDAR, el círculo señala la zona de Ostuacán. (*INEGI,2008*).



En la Fig. 3.4, la tira vertical derecha, representa el modelo original (LDR071222\_221716\_1.LAS) obtenido por INEGI. Este archivo tridimensional contiene 362,499,807 puntos ASCII organizados en una matriz (X, Y, elevación, intensidad, número de retorno, pulso y ángulo nadir). Para simplificar el proceso de fusión, se generó un nuevo modelo de la zona de Ostuacán (Fig. 3.5), seleccionando y recortando esta área en la tira original en el *software Surfer* de *Golden Software Inc.*

Parámetros	Polígono zona Ostuacán
<b>Sensor</b>	ALS40 montado en aeronave XC-GOO
<b>Fecha de captura</b>	26 – 27 de diciembre de 2007
<b>Ángulo de captura</b>	60°
<b>Altura de vuelo promedio</b>	3,000 m
<b>No. de puntos (recorte zona de estudio)</b>	1,079,700
<b>Separación máxima entre puntos (promedio)</b>	4.8 x 4.6 m
<b>Precisión puntos RMS</b>	0.38 m
<b>Sistema de referencia geodésico</b>	ITRF92

Tabla. 3.2 Características del modelo de nube de puntos recortados.

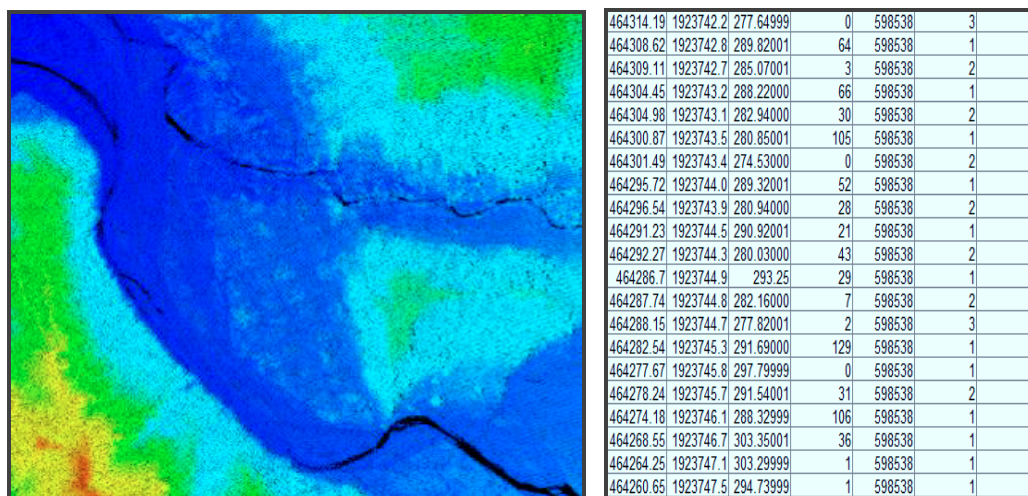


Fig. 3.5 Imágenes del archivo LiDAR Ostuacán: izquierda, representación gráfica; derecha, representación numérica.

### 3.1.1.2 Imágenes multiespectrales

Para este trabajo, también se obtuvieron imágenes satelitales SPOT (*Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre*) de la zona de estudio, gracias al grupo ERMEXS de la Secretaría de Marina. Las imágenes obtenidas fueron aquellas que se acercaran temporalmente a la captura de los puntos LiDAR (26-27 de diciembre), por ello se escogieron dos imágenes tomadas el 28 de diciembre de 2007, con un sólo un día de diferencia (Fig. 3.6)

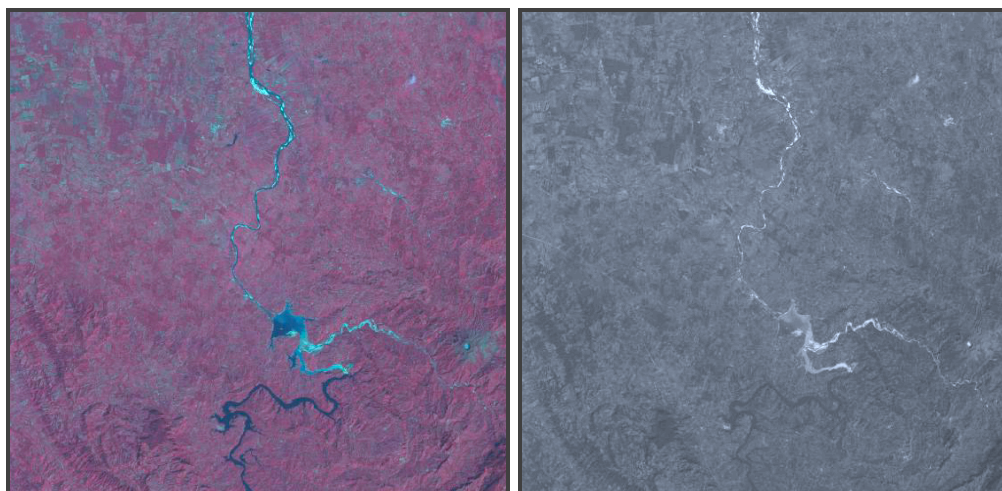


Fig. 3.6 Imágenes SPOT-5 Multiespectral (izquierda) y SPOT-5 PAN (derecha).

PARÁMETROS	E090204122017530	E090204122003958
<b>Sensor</b>	SPOT-5 Multiespectral	SPOT-5 Pancromático
<b>Resolución</b>	10 m	5 m
<b>Fecha y hora de la escena</b>	16:57:31, 28 de diciembre de 2007	16:57:29, 28 de diciembre de 2007
<b>Ubicación (path/row)</b>	KJ 601-315 N17° 31' 12" W93° 27' 35"	KJ 601-315 N17° 31' 12" W93° 27' 35"
<b>No. de bandas espectrales en micrómetros (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	4 Verde (0.50-0.59) Rojo (0.61-0.68) Infrarrojo Cercano NIR (0.78-0.89) Infrarrojo de Onda Corta SWIR (1.58-1.75)	1 Pancromática (0.49-0.69)
<b>Ángulo de elevación solar</b>	44.912459	44.909438
<b>No. de líneas</b>	3,001	12,001
<b>No. de píxeles por línea</b>	6,000	24,000
<b>No. total de píxeles</b>	3,001 x 6,000	12,001 x 24,000

Tabla. 3.3 Características de las imágenes SPOT-5.

## 3.2 Metodología experimental

### 3.2.1 Fusión de datos

Conceptualizando a la fusión de datos como un proceso de técnicas matemáticas-computacionales que combina o integra datos provenientes de diversos sensores con el objetivo de aumentar o mejorar la información capturada. En este proceso, siempre hay una pérdida de información, debido al procesamiento e integración de los datos, aunque también abre nuevos procesos, oportunidades y ventajas:

- a) Mejorar o discriminar ciertas variables o características de los datos existentes, (p.e. mejoramiento visual, extracción de rasgos o detectar cambios).
- b) Corregir o reducir errores, eliminar ambigüedad y redundante de los datos, principalmente en procesos de precisión, clasificación y referencia, minimizando tiempo de análisis y procesamiento.
- c) Adquirir nueva y mejor información partiendo de diversos datos (en lugar de utilizar una sola fuente de información), extendiendo la cobertura espacial, temporal y espectral de las escenas. Esto es de particular relevancia para procesos de clasificación posteriores.
- d) Demostrar la robustez o desempeño de una determinada metodología experimental por algoritmos matemáticos y computacionales.
- e) La eficiencia de la fusión dependerá del conocimiento de los datos a combinar y su asociación correcta.

Existen tres niveles de fusión (Fig. 3.7):

**1.- Fusión de datos de imágenes y datos semánticos**, fusión realizada a nivel de estructura computacional (semántica) y de señales (frecuencia).

**2.- Fusión de medidas estructuradas**, se realiza por medio de tres niveles: bajo, intermedio y alto (Véase en el **anexo** la tabla V. **Niveles de fusión de medidas estructuradas**) (Hall y Llinas, 2001:14-17; Solberg, 2007).

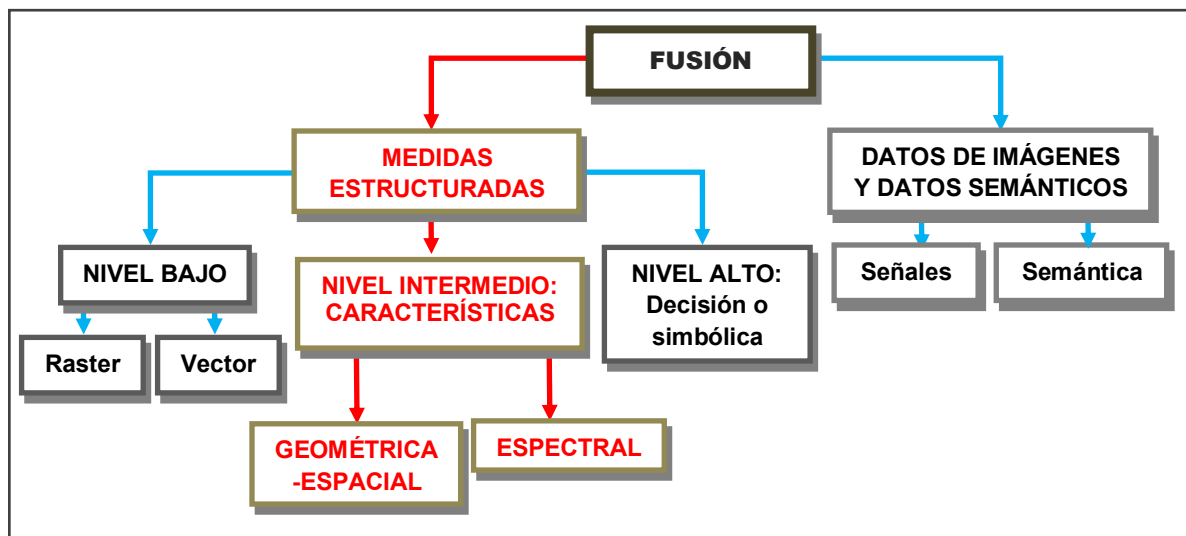


Fig. 3.7 Esquema de los niveles de fusión.

### 3.2.1.1 Fusión por extracción de características

El método de fusión por características de nivel intermedio de medidas estructuradas, consiste en la extracción de las características (*feature extraction*) relevantes en dos o más conjuntos de datos de entrada (datos crudos y datos donde se extraerán las características), éstos se concatenan (*feature matching*) y finalmente se agrupan por un algoritmo de clasificación (*feature classification*) (Solberg,2007):

**a) Clasificación supervisada.** Parte de un conocimiento previo de la zona de estudio, ya sea por trabajo de campo o información disponible (cartografía, imágenes), permitiendo al analista delimitar áreas representativas de las categorías a clasificar de la imagen (áreas/sitios de entrenamiento). Estas muestras entrenan al programa asignando las clases de referencia a los píxeles en función de su similitud de valores digitales. Según Solberg (2007) en la clasificación por fusión de características son utilizados los siguientes elementos como **sitios de entrenamiento**:

- **Espectral:** se buscan los niveles espectrales de las imágenes, generalmente ésta se utiliza en datos obtenidos por el mismo sensor.
- **Geométrica-espacial:** se buscan rasgos, figuras, bordes, líneas, contornos, regiones, texturas, intersecciones. Este se utiliza en datos provenientes de diferentes sensores (p.e. fusión de radar con imágenes ópticas).

Cada una de los anteriores puede fusionar datos de diferentes sensores, por lo tanto la determinación de aquellas características relevantes en los sitios de entrenamiento, dependerán de las entradas y salidas de los datos.

**b) Clasificación no supervisada o de agrupación (*clustering*).** En esta clasificación, no se cuenta con conocimiento o información previa de la zona de estudio y el analista se centra más en la interpretación de resultados. La ventaja de esta clasificación es la búsqueda y agrupación de forma automática de los valores digitales de píxeles homogéneos, por medio el número de clases que se desean establecer.

**c) Semi-supervisados o mixtos.** Por último existen métodos híbridos que combinan mecanismos de la clasificación supervisada y no supervisada (Chuvienco,2008:396).

Beraldin (2004) menciona que **los primeros trabajos de fusión de puntos LiDAR con sensores ópticos** fueron las investigaciones de Llinas y Waltz de 1990 y El-Hakim de 1994, cuyos experimentos generaron los primeros modelos digitales de elevación LiDAR. En el caso de la **clasificación y segmentación de puntos LiDAR**, la

segmentación por retornos en una nube de puntos (Fig. 2.5) es el ejercicio más sencillo de reconociendo de patrones en LiDAR, que según *Charaniya (2004:11-14)* fue posible gracias a las investigaciones de *Axelsson, Brenner, Haala, Kraus y Pfeifer* a finales de la década pasada. En los últimos años, la fusión de LiDAR con otros datos, se ha concentrado en la integración, validación y procesamiento de modelos terrestres tridimensionales, así como en la clasificación-segmentación de éstos: *Vosselman (2009)* realizó una clasificación de los elementos constructivos de un edificio (Modelo Digital de Construcciones) obteniendo características constructivas como marcos, dinteles, puertas, ventanas y muros.

### 3.2.2 Máquinas de soporte vectoriales

En esta tesis se utiliza un método de fusión basado en **Máquinas de Soporte Vectoriales (SVM Support Vector Machine)**, parte conceptualmente de la *Teoría del Aprendizaje Estadístico* y la *Teoría Vapnik-Chervonenkis*, teorías planteadas por los matemáticos Vladimir Vapnik y Alexey Chervonenkis, investigadores del *Adaptive Systems Research Department* de la *AT&T Bell Laboratories* de Nueva Jersey, EU (*Ivanciuc, 2005*).

Partiendo de la *Teoría del Aprendizaje Estadístico*, un algoritmo de aprendizaje debe de alcanzar un estado resultante a partir de una máquina de aprendizaje de los datos de entrenamiento (*Angulo, 2001:18*). La máquina de aprendizaje deberá elegir entre el conjunto de funciones, aquella función con menor discrepancia entre el conocimiento a priori con los datos de entrenamiento. Durante este proceso de elección, la máquina de aprendizaje pueden surgir dos tipos de riesgos: el riesgo empírico y el riesgo estructural.<sup>16</sup> En el caso del riesgo estructural, existen dos fenómenos:

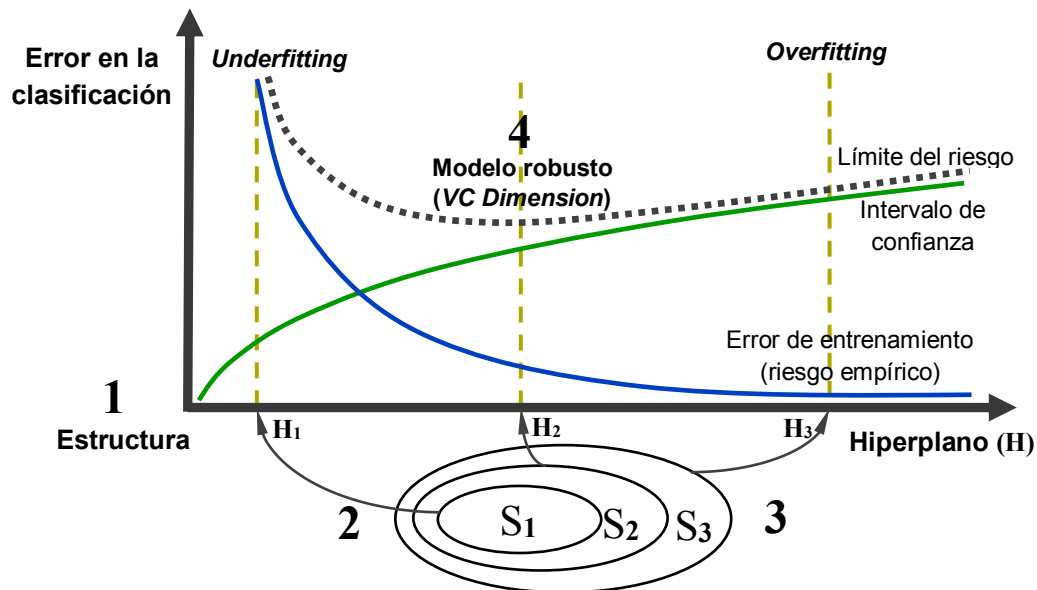
- a) **Overfitting**, este efecto a pesar de trabajar bien sobre los sitios de entrenamiento no produce una relación causal con la función de entrenamiento. Este error sucede comúnmente en los modelos de muy alta complejidad.

---

<sup>16</sup> El riesgo se define como el valor estadístico esperado o probable de una variable con respecto a una medida de probabilidad. El riesgo empírico está relacionado con los errores provenientes de los datos de entrenamiento, mientras que el riesgo estructural se relaciona con los errores de entrenamiento por parte del algoritmo.

**b) Underfitting**, este efecto se produce por la poca robustez del algoritmo para ajustar los datos, debido a las restricciones propias del modelo. Este error sucede en los modelos de baja complejidad. Para evitar o minimizar los anteriores errores al momento de ajustar los datos, la *Teoría Vapnik-Chervonenkis*, busca la **minimización del riesgo estructural** (*Structural Risk Minimization SRM*) (Shawe-Taylor et al. 1999), considerando el riesgo empírico, mediante cuatro pasos:

1. **Selección de funciones:** a partir de los datos de entrada (conocimiento *a priori*) se selecciona una clase o tipo de funciones en la estructura de datos.
2. **Aumento de complejidad:** en el espacio de características (*Feature Space*) se dividen las clases o tipos de funciones en subclases/subconjuntos de jerarquías anidadas para incrementar la complejidad (dimensionalidad). Debe mencionarse que el aumento de la complejidad, disminuye el *underfitting* en los datos, aunque el riesgo de *overfitting* se incrementará.
3. **Reducción/minimización del riesgo empírico:** este paso se logra reduciendo el intervalo de confianza de cada subclase/subconjunto de jerarquías anidadas.
4. **Selección de la dimensión VC:** una vez realizado el *empirical risk minimization*, se selecciona el modelo más robusto de cada subclase/subconjunto de jerarquías anidadas con base a la dimensión VC.<sup>17</sup>



**Fig. 3.8** Esquema gráfico de la minimización del riesgo estructural. Fuente: svms.org

<sup>17</sup> Dimensión VC (*Vapnik-Chervonenkis Dimension*), es el máximo número de puntos que puede separar un algoritmo de aprendizaje en base a una separación cardinal (hiperplano) entre los datos.

Una vez descritas los anteriores postulados, a continuación se describe brevemente los principios teóricos-matemáticos de las Máquinas de Soporte Vectoriales (*Townshend et al. 2002; Ivanciuc, 2005*) (Fig. 3.8) en base a la teoría de la Minimización del Riesgo Estructural.

- a) **Definición del hiperplano:** SVM separa dos conjuntos de clases por medio de un hiperplano ( $H$ ) de función lineal o no lineal (p.e. polinomial),<sup>18</sup> este hiperplano  $H$  también se denota como  $w \cdot x + b = 0$  (Fig. 3.9).

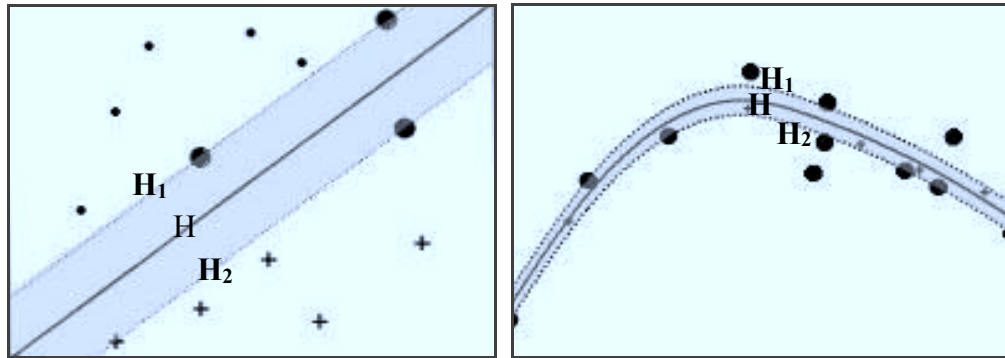


Fig. 3.9 Imágenes de hiperplano lineal e hiperplano no lineal.

- b) **Definición del margen-espacio:** una vez definido el hiperplano  $H$ , se trazan dos líneas paralelas o hiperplanos  $H_1$  y  $H_2$  (fronteras del clasificador). Al trazar dichas líneas se crea un margen-espacio, donde  $H_1$  se considera el hiperplano negativo y  $H_2$  el hiperplano positivo, de esta manera los conjuntos fuera de  $H_1$  se consideraran negativos (-1) y fuera de  $H_2$  positivos (+1). La distancia entre  $H$  y  $H_1$  o  $H$  y  $H_2$  es  $1/|w|$ ; mientras que la distancia del origen a  $H_1$  es  $b-1/|w|$  y  $H_2$  es  $b+1/|w|$ , el margen total es igual a  $2/|w|$ , donde se satisfacen las igualdades  $w \cdot x + b = -1$  que determina al hiperplano  $H_1$ ; y  $w \cdot x + b = +1$  que determina el hiperplano  $H_2$  (Fig. 3.10).

<sup>18</sup> Funciones no lineales como son las cuadráticas, curvilíneas, elípticas, gaussianas, radiales, hiperbólicas, sigmoideas, etc. De esta manera se originan SVM RBF (*Radial Basis Function*), SVM Polinomial, entre otros. En algunos casos al definir un kernel no lineal se aumenta la dimensionalidad de los datos (espacio n-dimensional).

c) **Vectores de soporte:** para reducir el riesgo empírico la teoría de SVM busca maximizar el margen-espacio  $2/|w|$  (Fig. 3.10), equivalente a minimizar  $|w|$  o  $(1/2)/|w|^2$  sujeto a las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} w \cdot x_i + b \geq +1 \\ w \cdot x_i + b \leq -1 \end{cases}$$

Si se define para cualquier clase  $X_i$ :

$$\text{Clase } \varphi(x_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } x_i \in \text{Clase 1} \\ -1 & \text{si } x_i \in \text{Clase 2} \end{cases}$$

El problema se expresa como

$$\min (1/2)/|w|^2$$

sujeto a

Clase positiva **clase**  $(x_i) w \cdot x_i + b \geq +1$

Clase negativa **clase**  $(x_i) w \cdot x_i + b \leq -1$

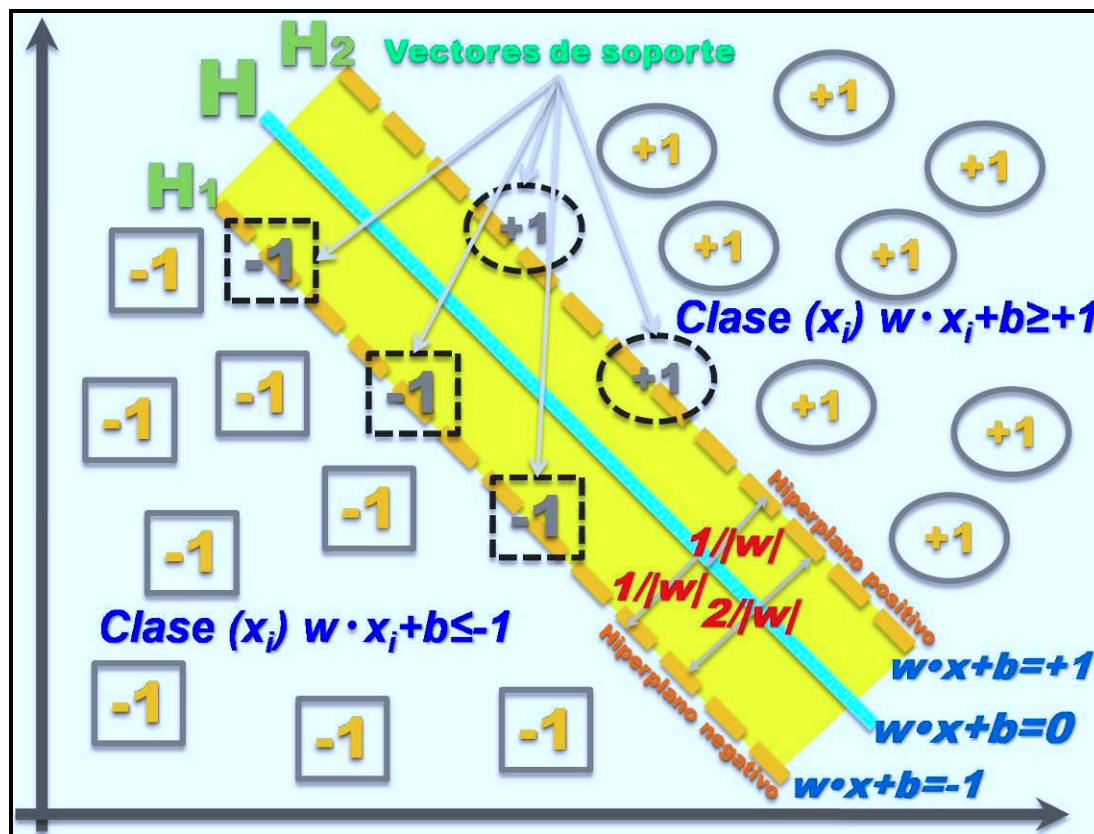


Fig. 3.10 Esquema del modelo del *Optimum Separation Hyperplane* OSH.

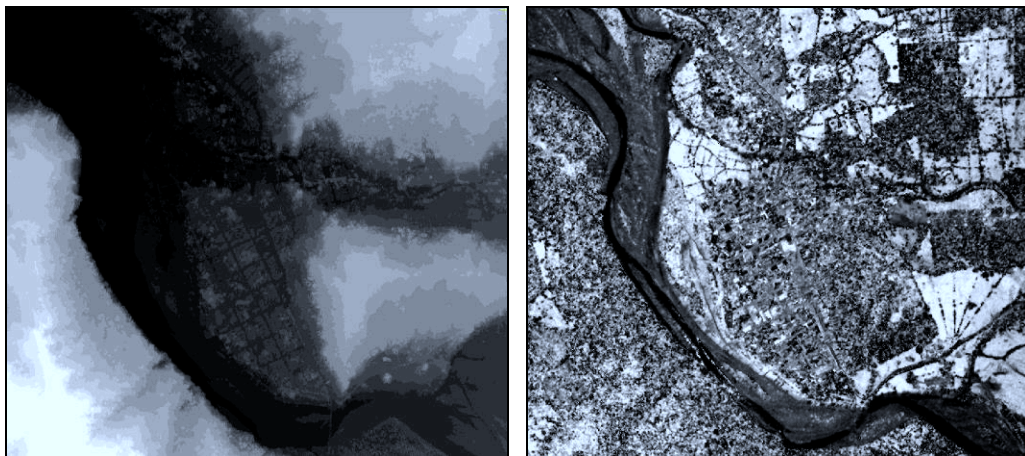


### 3.3 Procesamiento

Los datos brutos de la **nube de puntos LiDAR**, se seleccionan **las columnas X, Y, elevación e intensidad y se rasterizan** (pasar los puntos vectoriales tridimensionales a pixeles bidimensionales) obteniendo **dos modelos LiDAR con una resolución espacial de 1 m: modelo digital de elevación y malla de intensidad** (Fig. 3.11).

El **modelo digital de elevación**, obtiene un modelo de alturas y de intensidad entre el nivel de dosel-construcciones con el suelo, mientras que la **malla de intensidad** representa las características espectrales de los objetos (hojas de los árboles, suelo desnudo, suelos cultivados, caminos, cuerpos de agua, etc.) representadas en valores digitales.

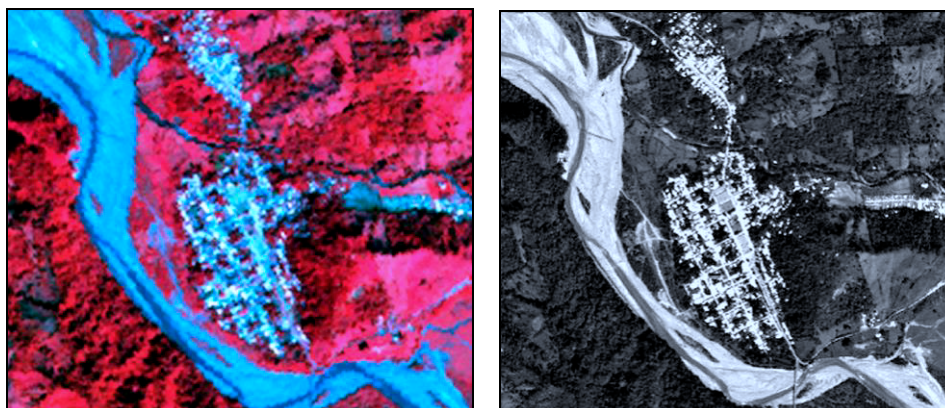
En el siguiente paso, al modelo de elevación y a la malla de intensidad, se les reduce el ruido generado durante la rasterización, por medio del filtro FGAMMA (*Lopes et al. 1993*) aplicado en modelos de radar y LiDAR. Este algoritmo elimina información redundante y delimita ciertos rasgos (bordes) de los objetos a clasificar, facilitando el posterior proceso de fusión.



**Fig. 3.11** Modelo digital de elevación (izquierda); malla de intensidad (derecha).

Las **imágenes multispectrales** originales necesitan ser corregidas para continuar las siguientes etapas del trabajo. La primera corrección realizada fue la **radiométrica**, que convierte los valores digitales del pixel a radiancia espectral, disminuyendo los efectos de la atmósfera e iluminación solar en la superficie terrestre de la imagen. Esta corrección fue efectuada por el calibrador radiométrico ATCOR (*Richter, 1990*) en el *software PCI Geomatics*.

La siguiente corrección, la **geométrica**, otorga a los píxeles coordenadas geodésicas válidas en el espacio geográfico, permitiendo integrar datos en posteriores análisis geoespaciales. Las imágenes procesadas radiométricamente fueron referenciadas al modelo digital de elevación STRM<sup>19</sup> para la República Mexicana, con proyección WGS 84 y sistema de coordenadas UTM 15 E012, por ser el área geográfica donde se ubica la zona de estudio. En *PCI Geomatics* se colocaron manualmente puntos de control distribuidos adecuadamente en las imágenes y el modelo digital, buscando coincidencias puntuales en el modelo digital e imagen no rectificadas con una precisión RMSE (estimador del error medio cuadrático) menor a 1, obteniendo una adecuada validez geodésica para las imágenes. Una vez terminadas las correcciones radiométricas y geométricas en ambas imágenes, se realizó un **recorte en las imágenes de la zona de estudio**, seleccionado por medio de coordenadas geográficas, la misma área del modelo LiDAR (Fig. 3.12).



**Figs. 3.12** Imágenes SPOT-5 Multiespectral (izquierda) y SPOT-5 PAN (derecha) de la zona de Ostuacán.

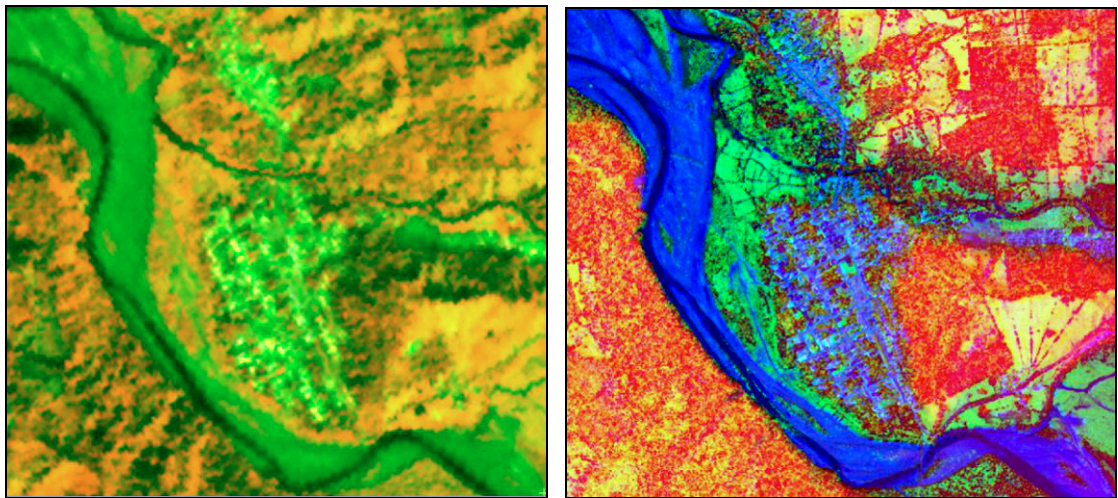
Como las mallas digitales LiDAR siguen proyectadas en ITRF92, se refirieron geométricamente a la misma proyección geodésica de las imágenes SPOT (*WGS 84 - UTM 15 E012*), haciendo coincidir en una sola **georreferencia** los píxeles de las mallas con los píxeles de las imágenes satelitales. Por último, se realiza un **remuestreo** de un **1 m** de resolución y **co-registro** entre el modelo de elevación, la malla de intensidad y las **imágenes SPOT** para que cuenten con la misma resolución y georreferencia sólo de esta manera podrá realizar el proceso de fusión correctamente.

<sup>19</sup> SRTM, *Shuttle Radar Topography Mission* de la NASA es un modelo del globo terráqueo realizado por Interferometría que cuenta con referencias geodésicas válidas para considerarse como base en cualquier corrección geométrica.

### 3.4 Resultados

#### 3.4.1 Clasificación supervisada y validación

Antes de realizar la clasificación, es necesario **compilar las capas** (*layer stack*) de las imágenes SPOT-5 recortadas multiespectral y pancromática; y de los modelos LiDAR de elevación e intensidad. Primero se compilaron la única banda pancromática con las cuatro bandas de la multiespectral formando una nueva imagen de cinco capas (Fig. 3.13); después, con esta última imagen generada se compilaron las bandas de la imagen de intensidad y modelo de elevación respectivamente, formando una nueva imagen que contiene **siete capas** (*R,G,NIR,SWIR,Pancromática,Intensity,Elevation*) (Fig. 3.13).



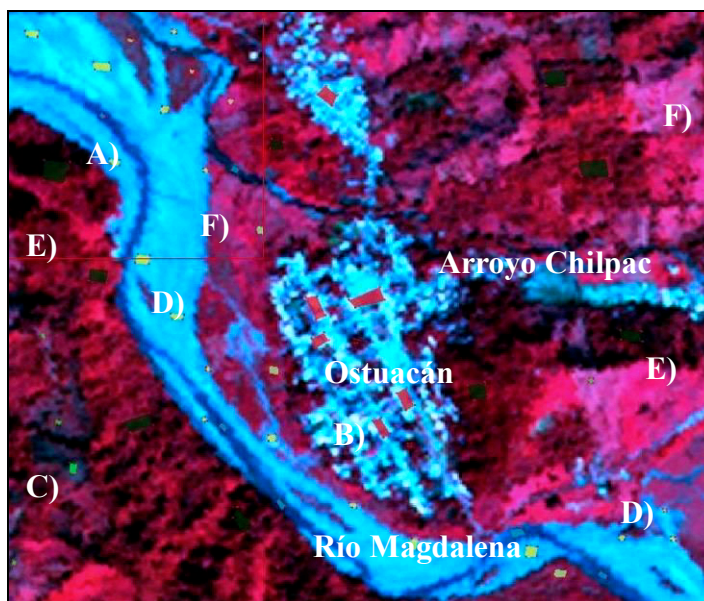
**Fig. 3.13** Imagen compilada multiespectral-pancromática de cinco capas (izquierda); imagen compilada multiespectral-pancromática-elevación e intensidad de siete capas (derecha).

El objetivo de esta compilación es contar con dos imágenes al momento de correr la clasificación SVM por medio de la prueba de cada imagen. Para ambas imágenes se seleccionaron los mismos sitios de entrenamiento y las mismas clases. Este procedimiento se realizó en *OTB-Monteverdi*,<sup>20</sup> proponiendo seis clases más representativas de la escena identificadas con los siguientes colores:

- A) **Agua**, azul claro. En esta clase se agrupa los cuerpos y corrientes de agua.
- B) **Asentamiento humano**, rojo. Clase que contiene las construcciones e infraestructuras.

<sup>20</sup> *Orfeo Toolbox* (OTB) es una amplia librería de programación C++ utilizada en el procesamiento de imágenes de Percepción Remota desarrollada por la Agencia Espacial Francesa (CNES) puesta de forma gratuita desde 2006. En diciembre de 2009, fue lanzada la versión amigable denominada *Monteverdi*, donde se despliegan algunas de las librerías, destacando la clasificación por SVM.

- C) **Pastizal**, verde olivo. Terrenos con pastos, pueden ser lugares de cultivo en reposo.
- D) **Suelo desnudo**, amarillo. Clase que contiene las arenas y suelos sin vegetación.
- E) **Vegetación alta**, verde oscuro. Clase que contiene principalmente las selvas altas.
- F) **Vegetación baja - agricultura**, verde claro. Clase que agrupa aquella vegetación selvática no alta como la selva o campos con cultivos.



**Fig. 3.14** Imagen multispectral-pancromática de la zona de estudio con los sitios de entrenamiento y algunas nomenclaturas.

Se agregan las clases y en la imagen desplegada en *Monteverdi*, se escogen los sitios (*Regions Of Interest ROI*) distribuidos en la imagen (Fig. 3.14). La identificación de la nomenclatura de la zona de estudio fue posible a *Google Earth, Panoramio* y la carta topográfica 1:50,000 Rómulo Calzada E15C38 (*INEGI, 2006*). Una vez seleccionado los sitios de entrenamiento y las clases, en *Monteverdi* se selecciona el tipo y parámetros de SVM. En las siguientes cuatro pruebas se escogió un **SVM lineal**, es decir, un hiperplano que pueda separar las clases linealmente. Para comprobar la eficacia de este separador, una vez que hizo el aprendizaje de los sitios, *Monteverdi* tiene la opción de desplegar la imagen clasificada resultante y la validación por matriz de confusión e índice kappa de dicha imagen como se muestra a continuación:

a) **CLASIFICACIÓN CON IMAGEN COMPILADA MULTIESPECTRAL-PANCROMÁTICA DE CINCO CAPAS.**

i. **Primera prueba con los sitios de entrenamiento comunes.**

Esta prueba fue realizada con los sitios de entrenamiento comunes para todas las clasificaciones, es decir, estos mismos sitios de entrenamiento utilizados en esta primera clasificación, también se aplicaron en la imagen compilada multiespectral-pancromática-elevación e intensidad de siete capas (iii prueba).

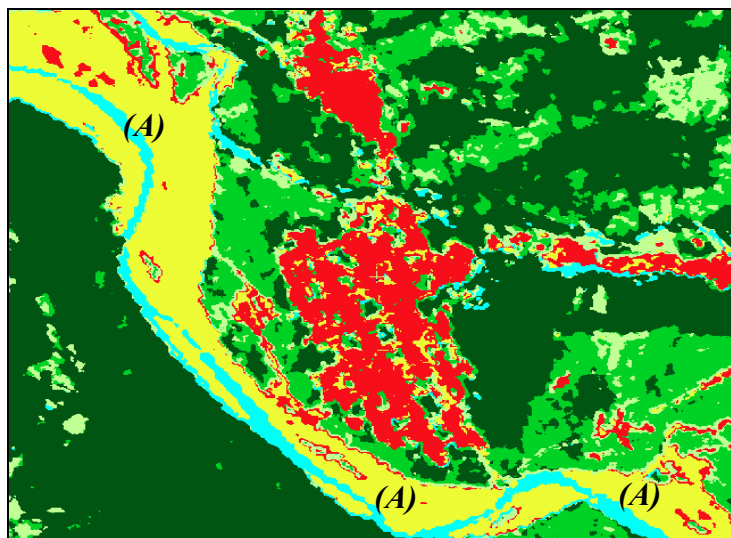


Fig. 3.15 Imagen resultante de la primera prueba.

Confusion matrix							
	Agua	Asentamiento	Pastizal	Suelo desnud	Veg alta	Veg baja agric	Sum
Agua	455 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	455
Asentamiento	0 (0.00%)	1988 (93.51%)	0 (0.00%)	138 (7.94%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	2126
Pastizal	0 (0.00%)	0 (0.00%)	300 (94.04%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	19 (3.65%)	319
Suelo desnud	0 (0.00%)	87 (4.09%)	2 (0.63%)	1650 (94.88%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1739
Veg alta	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	5409 (100.00%)	0 (0.00%)	5409
Veg baja agric	0 (0.00%)	0 (0.00%)	8 (2.51%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	513 (98.46%)	521
Sum	455	2075	310	1788	5409	532	

Accuracy	
Kappa	0.9639
Overall Accuracy	0.9760

Fig. 3.16 Matriz de confusión e índice kappa de la primera prueba.

Como resultado de esta prueba se obtuvo un Kappa de 0.9639, mostrando una buena separabilidad general de las clases, p.e. las clases agua y vegetación alta fueron muy bien separadas, aunque hubo una leve confusión de algunos píxeles entre las clases suelo desnudo y asentamiento humano, principalmente en los bordes del lecho del río Magdalena (A) (Fig. 3.15).

## ii. Segunda prueba con nuevos sitios de entrenamiento y nueva clase.

Esta segunda prueba, de la clase vegetación baja-agrícola se separó en dos clases: clase vegetación baja y clase agrícola, generando esta última una nueva clase, por este motivo se redefinieron los sitios de entrenamiento (nuevos sitios y distribuidos) y se posteriormente se clasificó.

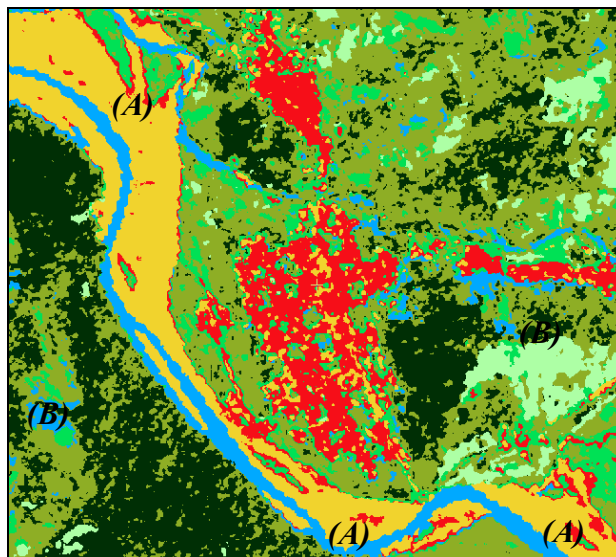


Fig. 3.17 Imagen resultante de la segunda prueba.

Confusion matrix								
	Agua	Suelo desnud	Pastizal	Veg alta	Veg baja	Agricola	Asentamiento	Sum
Agua	294 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	294
Suelo desnud	0 (0.00%)	1207 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1207
Pastizal	0 (0.00%)	0 (0.00%)	124 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	124
Veg alta	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	884 (99.77%)	2 (1.46%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	886
Veg baja	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	29 (3.27%)	108 (78.83%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	137
Agricola	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	87 (100.00%)	0 (0.00%)	87
Asentamiento	0 (0.00%)	5 (0.41%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	368 (98.66%)	373
Sum	294	1212	124	913	110	87	368	

Kappa	0.9843
Overall Accuracy	0.9884

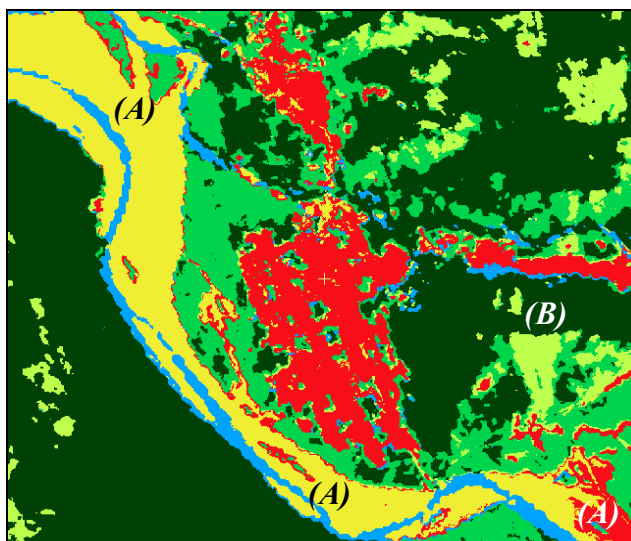
Fig. 3.18 Matriz de confusión e índice kappa de la segunda prueba.

En esta prueba se mejoró el índice Kappa de 0.9639 a 0.9843, mejorando la separabilidad de clases (agua, suelo desnudo, pastizal y agrícola), verificando que fue efectivo la redefinición de los sitios de entrenamiento y agregación de una nueva clase, aunque todavía hay mezclas en las clases vegetación baja, vegetación alta y asentamiento humano (A). También hay sitios que el algoritmo clasificó como agua cuando en realidad pertenecen a otra clase (B) (Fig. 3.18).

**b) CLASIFICACIÓN CON IMAGEN COMPILADA MULTIESPECTRAL-PANCROMÁTICA-ELEVACIÓN E INTENSIDAD DE SIETE CAPAS.**

**iii. Tercera prueba con los sitios de entrenamiento comunes.**

En la tercera y cuarta prueba se utilizaron todas las capas SPOT y LiDAR, además de manejar los mismos sitios de entrenamiento de la primera prueba. En éstas se prevé alcanzar el objetivo secundario 2 y comprobar la hipótesis 2.



**Fig. 3.19** Imagen resultante de la tercera prueba.

Confusion matrix							
	Agua	Asentamiento	Pastizal	Suelo desnudo	Veg alta	Veg baja agric	Sum
Agua	982 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	982
Asentamiento	0 (0.00%)	2095 (98.82%)	0 (0.00%)	25 (1.44%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	2120
Pastizal	0 (0.00%)	0 (0.00%)	623 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	623
Suelo desnudo	0 (0.00%)	51 (2.41%)	0 (0.00%)	1686 (97.06%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1737
Veg alta	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	5401 (100.00%)	0 (0.00%)	5401
Veg baja agric	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	530 (100.00%)	530
Sum	982	2146	623	1711	5401	530	

Accuracy	
Kappa	0.9905
Overall Accuracy	0.9933

**Fig. 3.20** Matriz de confusión e índice kappa de la tercera prueba.

Con el resultado de Kappa de 0.9905, demuestra la utilidad de aumentar de las capas LiDAR al separar mejor las clases, aunque persiste una ligera confusión de píxeles entre suelo desnudo y asentamiento humano, debido a la similitud espectral (A). También en esta prueba se presentó el mismo fenómeno de la clase agua en lugares donde pertenecen a otra clase (B) (Fig. 3.19).

#### iv. Cuarta prueba con nuevos sitios de entrenamiento y nueva clase.

Esta cuarta y última prueba, al igual que en la segunda prueba, se separó la clase vegetación baja-agricultura y se redefinieron los sitios de entrenamiento. Debe dejarse claro que esta redefinición de sitios es diferente a los de la segunda prueba.

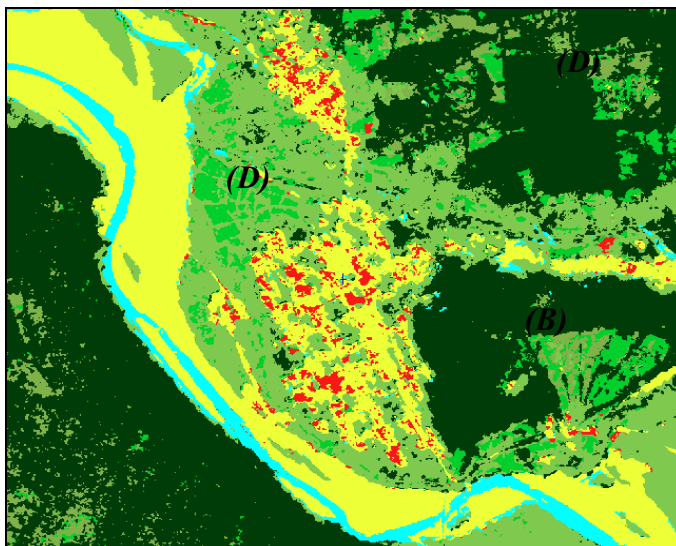


Fig. 3.21 Imagen resultante de la cuarta prueba.

		Confusion matrix						
	Agua	Suelo desnud	Pastizal	Agricultura	Veg alta	Veg baja	Asentamiento	Sum
Agua	540 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	540
Suelo desnud	0 (0.00%)	1164 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1164
Pastizal	0 (0.00%)	0 (0.00%)	208 (92.86%)	16 (2.84%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	224
Agricultura	0 (0.00%)	0 (0.00%)	9 (4.02%)	554 (98.40%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	563
Veg alta	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	4779 (100.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	4779
Veg baja	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	917 (100.00%)	0 (0.00%)	917
Asentamiento	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	247 (100.00%)	247
Sum	540	1164	217	570	4779	917	247	

Accuracy	
Kappa	0.9954
Overall Accuracy	0.9970

Fig. 3.22 Matriz de confusión e índice kappa de la cuarta prueba.

Como resultado de la redefinición de los sitios y de la clase agrícola, se mejoró el índice Kappa de 0.9954, reduciendo la confusión entre los píxeles de las clases suelo desnudo con asentamiento humano. Esta prueba también minimizó la confusión de la clase agua dentro de otra clase (*B*). Aunque persiste una ligera confusión entre las clases pastizal y agricultura (agrícola), hubo una mejor detección de bordes entre estas clases (*D*) (Fig. 3.21).



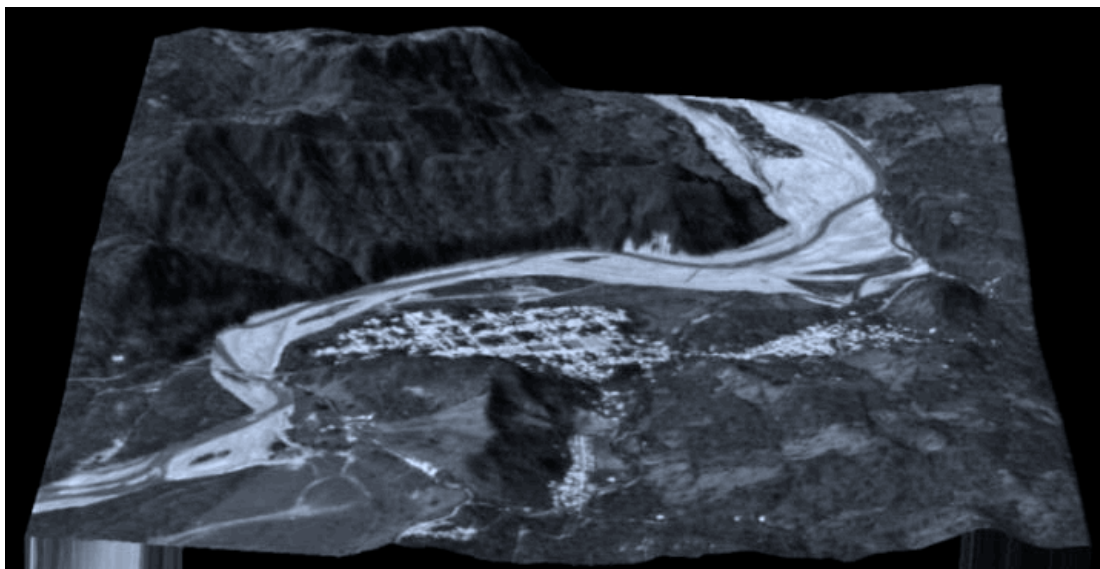
### 3.4.2 Análisis de resultados

Prueba	Kappa	Overall accuracy
PRIMERA	0.9639	0.9760
SEGUNDA	0.9843	0.9884
TERCERA	0.9905	0.9933
CUARTA	0.9954	0.9970

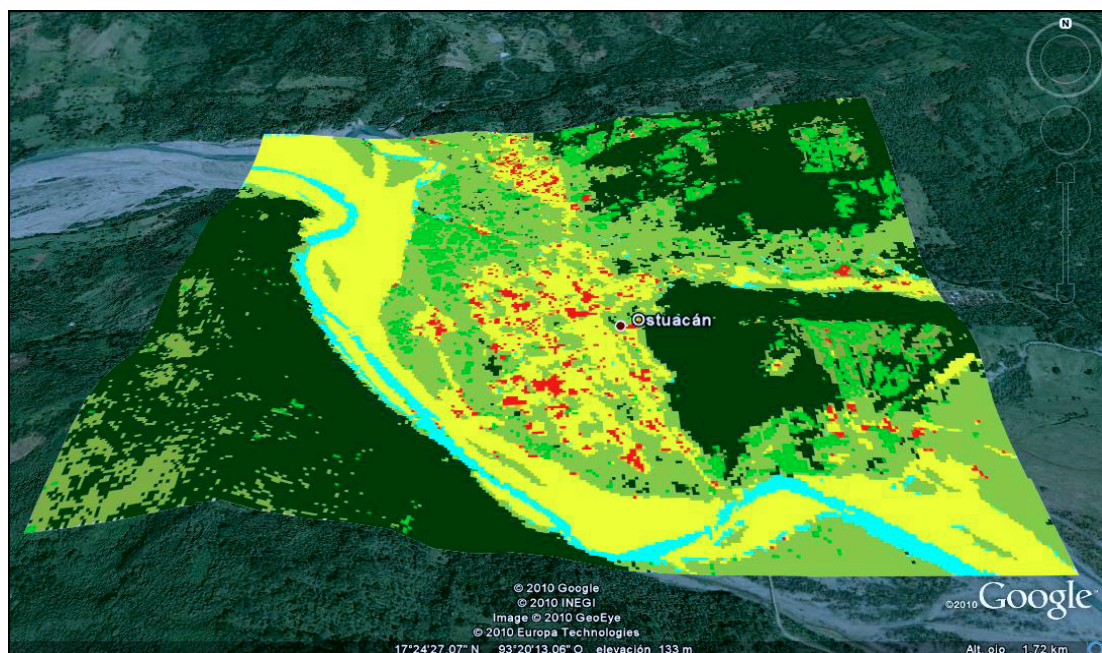
**Tabla. 3.4** Síntesis de validación de las pruebas en *Monteverdi*.

La anterior tabla muestra la mejora continua de las pruebas realizadas, con la mejora de estos índices kappas, en especial de la cuarta prueba y la incorporación de la malla de intensidad y el modelo de elevación LiDAR, **se muestra que la hipótesis 2, si es posible mejorar la clasificación de usos de suelo en la zona de Ostuacán, que si se hubieran realizado separadamente.** Esto comprueba que es adecuado fusionar las bandas de las imágenes SPOT-5 con los modelos raster de LiDAR para obtener las clases. A pesar de estos resultados, puede plantearse posteriormente la **utilización de otros insumos ópticos de mayor resolución espacial y de bandas hiperespectrales**, inclusive incorporar otras capas de información como LAI, NDVI, etc., en otro trabajo futuro de investigación.

Como parte del proceso de análisis de resultados, el índice Kappa y *Overall accuracy*, se consideran adecuados para validar estas pruebas, ya que **se descartó validar con otras formas como la cartográfica**, principalmente por los factores de resolución espacial y temporal, situación que se presenta en la cartografía oficial de INEGI (Carta topográfica 1:50,000), INEGI-INE (Usos del suelo y vegetación) o CONABIO (Usos del suelo y vegetación modificado), ya que la resolución de las clases-capas en estas cartografías son muy generales, para un resultado muy fino de las cuatro pruebas por SVM, en especial de la cuarta prueba, donde se logró la mejor separabilidad-clasificación. En un trabajo posterior podría ampliarse más la validación por medio de ortofotos con buena resolución espacial o una imagen *QuickBird* (QB02-1010010007A25B01) de 31 de enero de 2008 cuya resolución de Pan 0.61 m, sería una de las formas de validación más adecuada.



**Fig. 3.23** Integración de la imagen pancromática SPOT con el modelo digital de elevación LiDAR realizado en FUSION/LVD.



**Fig. 3.24** Integración de la imagen de la cuarta prueba en *Google Earth*.

## 4. TRABAJO FUTURO

### 4.1 Línea de investigación: Percepción Cercana/*Prosdetección*

“En aquel imperio, el Arte de la Cartografía logró tal Perfección que el mapa de una sola Provincia ocupaba toda una Ciudad, y el mapa del Imperio, toda una Provincia. Con el tiempo, esos Mapas Desmesurados no satisficieron y los Colegios de Cartógrafos levantaron un Mapa del Imperio, que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él” (*Borges, 1999:119*).

Una área emergente del LiDAR, además de la aerotransportada, es el terrestre, también conocido como Vertical,<sup>21</sup> HDS (*High-Definition Surveying*, Topografía de Alta Definición) o LADAR (*Light Detection And Ranging*). El **LiDAR terrestre** se compone de dos modalidades: fija-estática y móvil-cinemático<sup>22</sup> (*Ingensand,2006*). La modalidad fija se realiza en un tripié, mientras que los sistemas móviles capturan mayor detalle (resolución) de escaneo en menor tiempo que los sistemas fijos<sup>23</sup>.

En general, todos los sensores LiDAR terrestres fijos o móviles, operan con un receptor GPS para determinar la posición geodésica de los puntos escaneados; mientras los sistemas móviles, integran además sistemas inerciales, para corregir los movimientos generados por el vehículo durante el escaneo. La integración GPS-sistemas inerciales permiten el escaneo ininterrumpido del trayecto, sin importar que el vehículo se detenga, disminuya o acelera su velocidad, inclusive dentro de túneles vehiculares o calles muy arboladas (*Harrap y Lato,2008*), evitando el reescaneo del recorrido, errores de aglomeración de puntos, saturando la memoria digital, etc. (*Glennie,2009*).

Recientemente el LiDAR terrestre se aplica en áreas de la arquitectura, restauración de monumentos históricos, instalaciones industriales, arqueología, criminalística, debido a

<sup>21</sup> Otros términos recurrentes son: *Terrestrial Laser Scanner, Land-Based LiDAR Mapping, Land Based Mobile Mapping Systems, Terrestrial 3D Laser Scanner, Close-range Laser Scanner, Ground-based Laser Scanner* y *Tacheometric Laser Scanner*.

<sup>22</sup> *Schwarz y El-Sheimy (2007)* proponen el término Sistemas de Mapeo Móviles (*Mobile Mapping Systems*) para diferenciarla de los sistemas de capturas aéreas o satelitales.

<sup>23</sup> A continuación se muestran algunos sistemas LiDAR terrestres móviles:

**a) Comerciales:** *STREETMAPPER 360, 3D Laser Mapping – IGI GmbH; TITAN, Terrapoint Ambercore; VMX-250, CityGRID Scanner RIEGL; LYNX, Optech; Fugro Roadware, FUGRO; Mobile Mapping Van, Tele Atlas; Trident-3D Road Mobile Mapping Solution, GEO-3D Trimble; TruckMAP, John E. Chance and Associates Inc.*

**b) Académicos:** *GEOMOVIL, GEOVAN, Institut Cartogràfic de Catalunya; Geomaster, Centre for Spatial Information Sciences of the University of Tokyo; Indoor MMS, National Research Council of Canada; Laser Scanner MSS, WUMMS, Wuhan Technical University; MoSES, University of the Federal Armed Forces Munich; VISAT, Van Mobile Mapping System, University of Calgary, Canada. GPSVan, de la Universidad Estatal de Ohio, fue el primer ejemplo de un sistema móvil que integraba una antena receptora GPS, cámaras fotográficas y de video montados en una van (*El-Sheimy,2008*).*

la representación tridimensional terrestre, obteniendo detalles milimétricos de gran precisión. La escala terrestre del LiDAR, al modelar el paisaje geográfico a perspectiva del observador visual, posibilita la semi-inmersión (navegación) dentro del modelo, que no sucede en los modelos obtenidos por geotecnologías remotas (aerotransportadas y satelitales). **La inmersión del observador dentro del modelo LiDAR**, no es explicada por el actual marco conceptual y técnico de la Percepción Remota o la Cartografía tradicional, porque ambos han sido rebasados ante esta nueva emergencia tecnológica. Por esta razón, algunos miembros académicos han planteado la posibilidad de **establecer un nuevo y propio marco conceptual-disciplinario** para esta modelación geoespacial cercana (*Harrap y Lato, 2008; Lichti et al. 2008*) por medio de nuevas propuestas conceptuales, entre las que destacan:

- i. **Teledetección cercanas o Teledetección terrestre**,<sup>24</sup> propuesta por la Universidad de Vigo, España (2004), agrupa líneas de investigación en radar, Fotogrametría de Objeto Cercano, escaneo láser 3D LiDAR y Teledetección forestal. Entre los trabajos de aplicación destacan la restauración y conservación de monumentos arquitectónicos, arqueológicos e históricos, recursos forestales, etc.
- ii. **Close Range Sensing** de la *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS (2009), que bajo este nombre agrupa a la V Comisión Técnica dedicada a aplicaciones métricas industriales, patrimonio cultural, mapeo móvil, escaneo láser terrestre, fotogrametría terrestre, entre otras aplicaciones emergentes, que han sido presentadas en la revista arbitrada de ISPRS: p.e. dos números completos al LiDAR Terrestre y la Fotogrametría de Objeto Cercano en 2008 y 2009 (*Lichti et al. 2008; Mass y Luhmann, 2009*).

En este trabajo, de las anteriores propuestas de nombres propios para la modelación geoespacial cercana, será tratado como **Percepción Cercana** o **Prosdetección**<sup>25</sup>, marco de conocimiento emergente en la Geomática, cuyas características son:

---

<sup>24</sup> También la *Universidad Politécnica de Valencia*, España, cuenta con el Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) y la *Newcastle University Photogrammetry and Laser Scanning Research Team*, Inglaterra, también realiza investigación en aplicaciones cercanas-terrestres.

<sup>25</sup> La propuesta de noción de *Prosdetección* se deriva del latín *proximus*, cercano; y detección, es decir, detección cercana o próxima. A partir de este momento Percepción Remota y Teledetección se consideran disciplinas sinónimas al igual que la propuesta de noción de *Percepción Cercana* y *Prosdetección*.

**1) Modelación a perspectiva visual del observador.** Escala geoespacial más cercana o próxima entre el observador y el modelo LiDAR por medio de dos tipos de inmersiones:

- i. **Semi-inmersivo:** modelos que a pesar de contar con el límite físico de un dispositivo (pantalla, marco, cuadro), brindan al usuario cierta la sensación de navegación a través del modelo.
- ii. **Inmersivo:** cuando se logra la inmersión total por medio de dispositivos especiales o prótesis corporales (lentes, goggles, cascos, guantes, chalecos de sensaciones, olores, etc.) como lo planteó *William Gibson* en *Neuromancer* (1984). Pocos modelos geoespaciales llegan a este nivel inmersivo, pero paradójicamente, nunca podrá simular totalmente al espacio real ni sus experiencias reales.

**2) Representación digital más fidedigna del espacio geográfico.** Esto se logra a través de a representación más aproximada (real) del modelo LiDAR al paisaje geográfico representado.

**3) Generación de conocimiento geoespacial.** Esta es la principal diferencia con otras representaciones computacionales (virtuales), cuyo objetivo son más representativos y de entretenimiento. Debe añadirse que esta modelación puede generarse en tiempo real por herramientas sofisticadas e interoperables tecnológicamente.

Dentro del marco de conocimiento propuesto de la *Percepción Cercana* o *Prosdetección* donde se inserta el LiDAR terrestre, también **se integran otras geotecnologías terrestres** como la **Fotogrametría de Objeto Cercano, Videogrametría y Termografía**, dichas geotecnologías se componen de imágenes raster estáticas y dinámicas.

La **Fotogrametría de Objeto Cercano** (conocida también como *Fotogrametría Terrestre* o de *Rango Cercano*) comenzó como técnica óptica auxiliar en levantamientos topográficos (fototeodolitos). La integración del GPS e INS en dichas técnicas permitió evolucionar hacia los sistemas móviles terrestres (automóviles), que capturan fotografías georreferidas (GPS-INS) en una ruta terrestre, generando escenas esféricas 360°, como sucede con *Google Street View*, aplicación que representa escenas urbanas esféricas.

Si bien ésta no es la única aplicación fotogramétrica terrestre en la web,<sup>26</sup> Google ha tenido un fuerte impacto en la representación digital del paisaje geográfico.

La **Videogrametría**, es aplicada en plataformas fijas o móviles para analizar, medir y representar el movimiento (trayectorias-flujos) de los objetos<sup>27</sup> (p.e. personas, vehículos, nubes) simplificando el monitoreo espacio-temporal, por medio de técnicas de captura del movimiento (*motion capture*) en cámara lenta, rápida o tiempo real. La Videogrametría todavía se encuentra en etapa de experimentación en las Geociencias, por ello todavía se requiere de mayor tiempo de procesamiento (errores, distorsiones) que otras geotecnologías. El caso de la **Termografía** o **Tomografía**, es un caso particular de Fotogrametría de Objeto Cercano y Videogrametría, ya que utiliza las bandas espectrales infrarrojas térmicas de las imágenes, sean dinámicas o estáticas., permitiendo la medición térmica de los objetos (*Maas,2008*).

Por último, en la *Percepción Cercana* o *Prosdetección* donde se inserta el LiDAR terrestre, la Fotogrametría de Objeto Cercano y Videogrametría, también se integra la **Geo-cibernética**, debido a la relación modelado terrestre - observador. La Geo-cibernética surge como un marco conceptual emergente, ante los procesos sociales generados por los Atlas Cibernéticos y las Soluciones Complejas de Geomática que rebasaron por mucho el enfoque cibercartográfico.<sup>28</sup> Aunque los autores (*Reyes et al. 2006*) no definieron el término de Geo-cibernética, dejaron abierta la posibilidad de ir definiéndola conforme se avance en la investigación, dejando claro que esta tenía que

---

<sup>26</sup> *Kartmania-Yandex (Moscú); NORC (algunas ciudades de Europa Oriental); Mapjack (EU, Tailandia); Location View (Japón), Driveme.in (India); City8 (China); EveryScape (EU, Europa, Oceanía, Asia); Seety (Italia, Londres); Kapou (Grecia); Gade (Dinamarca); Hitta (Suecia); Mapplo (Buenos Aires, Argentina).* Aunque la mayoría de estos navegadores fotogramétricos no permiten la medición topográfica directa sobre las imágenes, existen aplicaciones que ortorectifican y corrigen las distorsiones para que en las imágenes se realicen mediciones geométricas válidas (p.e. *Active Link Vision ALV* para *ArcGIS*, *Earthmine*, *3DMM*, *Photomodeler*).

<sup>27</sup> Una aplicación interesante es *iCosmo* de la empresa japonesa *Iwane Laboratorie*, que realizó varios recorridos videogramétricos integrados en un sistema móvil para las ciudades de San Diego, Seúl, Dubai, Bangkok, Estambul, entre otras.

<sup>28</sup> La Cibercartografía, propuesto por *Fraser Taylor* en 1997 en la *18th International Cartographic Conference* como “*la organización, presentación, análisis y comunicación de toda la información que tiene y se genera sobre un espacio*”, es lograda a través de la multisensorialidad, la multimodalidad, la interactividad, la interdisciplinariedad y la relación con los usuarios que no son considerados en la cartografía tradicional. En el caso de la multisensorialidad, Taylor propone la utilización de varios recursos digitales como videos, fotografías, audio, sonidos, mapas táctiles y olores en el artefacto computacional (*Taylor, 2003:407*).

construirse a partir de la Geomática, Cibernética, disciplinas psicológicas-cognitivas, entre otras.

Partiendo de la Cibernética<sup>29</sup>, la Geo-cibernética puede explicar la relación del observador en la inmersión de los modelos LiDAR terrestres. En este trabajo se entiende por Geo-cibernética como la *transdisciplina que estudia como las personas (quien realiza el modelo y los actores a quienes va dirigido el modelo) perciben, reconocen, abstraen, entienden e interpretan el paisaje geográfico representado en los modelos digitales tridimensionales. Parte de la Geo-cibernética tiene como objetivo facilitar la interacción y transmisión del conocimiento geoespacial tácito en explícito de las personas para que éstos: i. Transformen su realidad espaciotemporal; ii. Desarrollen constantemente sus mapas internos; y iii. Generen conocimiento colectivo y consensos.*

La Geo-cibernética permite explicar la navegación de los usuarios dentro de los modelos LiDAR terrestres, ya que dichos modelos están transformando la percepción e interpretación del paisaje geográfico, ya que no se trata solamente de una aplicación tecnológica, sino *una nueva espacialidad digital*<sup>30</sup> (Echeverría, 2000:116-118; Fernández Beites, 2007:120-122), que permite la navegación dentro de los modelos.

Históricamente aunque de la Teledetección emergió tecnológicamente la *Prosdetección*, ésta no puede considerarse como sinónimo de Teledetección, ya que están emergiendo algunas diferencias entre ambas:

1. Tanto la Teledetección como la *Prosdetección* son geotecnologías complementarias que modelan el paisaje geográfico, por lo tanto la *Prosdetección* no sustituye ni elimina a la Teledetección.
2. Existe una diferencia notable de escala en Teledetección y *Prosdetección*: la primera, modela, mide y representa el espacio remoto (imagen satelital o aérea); la segunda, representa y navega a través del modelo. En el caso de la *Prosdetección*, la escala numérica o gráfica, está transitando hacia a una más personal, próxima e inmersiva.

<sup>29</sup> “Ciencia que estudia los principios abstractos de la organización y funcionamiento de los sistemas complejos” (Reyes et al. 2006:10).

<sup>30</sup> Javier Echeverría: “Estamos acostumbrados a pensarlo como un espacio informacional y no como un espacio de acción... Hemos sido educados para expresarnos plausiblemente en los escenarios del primer y segundo entorno [natural y construido], pero ignoramos casi todo sobre la estructura del espacio telemático... porque carecemos de formación para movernos e intervenir en este nuevo espacio...” (2000:117).”

Si bien comienza la utilización de las geotecnologías de Prosdetección, todavía hace falta más conocimiento y aplicación de éstas en el ámbito académico de las Ciencias de la Tierra, por ello, quedan retos por minimizar como el costo de adquisición de equipo, el tamaño digital de los archivos y procesamiento de datos. Estas barreras están todavía en proceso de ser mitigadas gracias a los avances en capacitación de mayor profesionistas en estas geotecnologías e investigación en sensores, *softwares*, e integración con otros sensores (p.e. fusión de sensores ópticos con LiDAR terrestre en tiempo real) (*Mrstik y Kusevik, 2009*).

## CONCLUSIONES

Como se refirió al principio, si bien *Dobson* planteó la automatización de la Geografía, ante los cambios sucedidos en la cartografía en los ochenta, la realidad geoespacial evolucionó a tal grado que permitió la emergencia de nuevas geotecnologías como el LiDAR. Aunque el LiDAR surgió dentro de la Fotogrametría y Topografía (disciplinas científicas integrantes de la Geomática), está en un momento de gran expansión de aplicaciones, en particular a escala remota (aerotransportada) y terrestre, permitiendo una nueva forma de modelar y representar el paisaje geográfico.

En base a los resultados de validación, se mostró las ventajas de fusionar los datos LiDAR aerotransportado con imágenes multiespectrales SPOT en la obtención de usos de suelo, mediante la clasificación por SVM, evidenciando la importancia de incluir estos insumos tecnológicos en trabajos posteriores sobre usos de suelo y clasificación. Por otra parte, la transición de la representación bidimensional a tridimensional que está encabezando el LiDAR terrestre, está generando un nuevo marco de conocimientos: como *Percepción Cercana/Prosdetección*. Este nuevo campo, brinda nuevas oportunidades de desarrollo, aplicación y generación de conocimientos a la ciencia Geomática.

Aún con estos alentadores avances, el LiDAR y la *Prosdetección*, tienen el reto de explorar otros ámbitos académicos (no solo el geoespacial) para seguir evolucionando y generar más conocimiento científico y contribuir en la mitigación de problemas sociales, buscando una estrecha relación con el ciudadano ajeno a la ciencia para que dicho cuerpo de conocimientos le pueda mitigar o resolver sus problemas.



## ANEXO

### I. APLICACIONES DEL LIDAR EN DISCIPLINAS

DISCIPLINAS	EJEMPLOS DE APLICACIÓN
<b>Minería</b>	Representación 3D de minas para analizar la potencialidad o rendimiento ( <i>Kurz et al. 2008</i> ).
<b>Sismología</b>	Monitoreo de cambios topométricos en fallas y fracturas geológicas, laderas de montañas y volcanes ( <i>Toth et al. 2006</i> ).
<b>Hidrología</b>	Generación de MDT para modelación hidrológica: áreas de captación, orden de escorrentías, erosión, etc. ( <i>Airborne imagine, 2009</i> ).
<b>Oceanografía costera</b>	Monitoreo de sedimentos (erosión), dunas, perfiles topográficos de acantilados ( <i>USGS, 2006</i> ).
<b>Glaciología</b>	Monitoreo de glaciares: masa, desplazamientos, derretimiento como efectos del calentamiento global ( <i>USGS, 2006</i> ).
<b>Riesgos y prevención de desastres</b>	Mapeo y monitoreo de zonas vulnerables y siniestradas: inundaciones hidrometeorológicas, deslizamientos terrestres, etc. Este tipo de modelado requiere de varios modelos digitales como terreno, superficies, construcciones. Como ejemplo de modelos integrados en un desastre fue el levantamiento LiDAR para las inundaciones generadas por el huracán Katrina en Luisiana, EU ( <i>Wade, 2008</i> ).
<b>Criminalística</b>	Modelos con gran detalle y resolución en el análisis y peritaje: escenas criminales, accidentes automovilísticos, etc. ( <i>LeicaGeosystems, 2006</i> ).
<b>Arqueología e historia</b>	Modelos aerotransportados para la exploración e investigación en campo: generación de un modelo de superficies para identificar estructuras arqueológicas cubiertas por la vegetación, este análisis sólo puede realizarse por LiDAR ( <i>GBFC, 2009</i> ). Modelos de gran resolución: conservación, consolidación y restauración de edificaciones antiguas ( <i>Alshawabkeh, 2005</i> ).
<b>Infraestructura</b>	Esta es una área destacada del LiDAR por su nivel de detalle y precisión requerida en la modelación de redes de infraestructura: líneas de transmisión eléctricas, oleoductos, gasoductos, acueductos, vías ferroviarias, vías carreteras, etc. ( <i>Simard et al. 2006</i> ). También destacan modelos LiDAR de instalaciones industriales que requieren de gran detalle como una refinería.

<b>Arquitectura, construcción y obras públicas</b>	Modelos de gran resolución y precisión: acabados, cálculo estructural, construcción, planificación de la construcción, valuación inmobiliaria, monitoreo (estado constructivo, deformaciones, grietas). Estos modelos pueden representar viviendas, grandes edificios, obras civiles (túneles, presas, puentes, etc.) (Roca, Marambio, 2007).
<b>Urbanismo</b>	Generación de modelos urbanos para la planificación urbana, valuación catastral, construcción, conservación de sitios históricos, inventarios urbanos (infraestructura, mobiliario, servicios, arbolado, espacios abiertos, calles y avenidas). Recientemente, ciertas modelaciones urbanas se integran o fusionan con otros datos geoespaciales (imágenes satelitales y fotogramétricas aéreas-objeto cercano) obteniendo maquetas urbanas muy fidedignas (Früh, Zakhor, 2001) (LMVC, 2007) (Lafarge et al. 2008).
<b>Forestal</b>	<p>Ámbito pionero en la investigación y aplicación del LiDAR. Los modelos forestales permiten el monitoreo e impacto de fenómenos atmosféricos, contaminación, deslizamientos terrestres, sequías, incendios, plagas y destrucción humana causadas a los bosques (Koch, Dees, 2008).</p> <p>A partir de un modelo <i>Canopy Digital Model</i> se pueden obtener variables de altura, diámetro, área basal y densidad (volumen). Dichas variables pueden procesarse para generar nueva información como clasificación de especies, edad, cuantificación maderable, cambios (deforestación, degradación, reforestación). Mediante la fusión de datos provenientes de sensores ópticos (bandas rojas e infrarrojas) se mejora el análisis sobre variables biofísicas y estado de la vegetación (Lucas et al. 2008).</p> <p>Recientemente destaca la aplicación modelos LiDAR y otros datos fusionados en estudios del cambio climático: estimación de captura de carbono y pago de este servicio ambiental. Esta aplicación se estima como muy prometedora en el corto plazo (Stephens et al. 2007) según evidencias encontradas en Canadá, Nueva Zelanda, países escandinavos y EU. Por último se destaca la misión NASA Carbon-3D, que utiliza dos sensores satelitales (uno LiDAR y otro óptico multiespectral) para estimar la biomasa y captura de carbono de los bosques. (NASA 3D-Carbon, 2009).</p>

## II. SENSORES LIDAR

NOMBRE	COMPAÑÍA	VEHÍCULO	LONGITUD DE ONDA	No. DE RETORNOS	TIPO DE ESPEJO	DISPOSITIVOS ADICIONALES	APLICACIONES PRINCIPALES
FLI-MAP 400	<i>Fugro</i>	Helicóptero Avión	1,500 nm *	4 (Primero, segundo, tercero, último)	Rotatorio	Cámara digital	Mapeo de terreno y de corredores.
LiteMapper 2400	<i>IGI</i>	Helicóptero	905 nm	Sólo 1 (Primero o último retorno)	Poligonal rotatorio	Cámara digital RGB / CIR	Corredores, líneas eléctricas.
LiteMapper 5600	<i>IGI</i>	Helicóptero Avión	1,550 nm	Más de 4	Poligonal rotatorio	Cámara digital RGB / CIR	Móvil: Terreno, urbano, líneas eléctricas, corredores, inundaciones.
LiteMapper 5600	<i>IGI</i>	Helicóptero Avión	1,000 nm	Más de 4	Rotatorio	Cámara digital RGB / CIR	Terreno, urbano, inundaciones, forestal.
ALS50-I ALS60	<i>LeicaGeosystems</i>	Helicóptero Avión	1,064 nm	4	Oscilatorio	Cámara digital	Terreno, urbano, inundaciones, forestal, líneas eléctricas, corredores, carreteras y caminos, desastres y riesgos, costas.
ALS Corridor Mapper	<i>LeicaGeosystems</i>	Helicóptero	1,064 nm	4	Oscilatorio	Cámara digital	Corredores, líneas eléctricas, carreteras y caminos.
ALTM Orion	<i>Optech</i>	Helicóptero Avión	1,064 nm	4	Oscilatorio	Cámara digital	Terreno, urbano, forestal.
ALTM Gemini	<i>Optech</i>	Avión	1,060 nm	4	Oscilatorio	Cámara digital	Terreno, urbano, inundaciones, líneas eléctricas, desastres y riesgos.
LMS-Q560 LMS-S560	<i>RIEGL</i>	Helicóptero Avión	1,500 nm	Más de 4	Rotatorio	Cámara digital	Terreno.
LMS-Q680	<i>RIEGL</i>	Helicóptero Avión	1,550 nm	Más de 4	Rotatorio	Cámara digital	Mapeo de corredores, terreno, urbano, forestal.

## II. SENSORES LIDAR (Continuación)

VQ-480	<i>RIEGL</i>	Helicóptero	1,550 nm	Más de 4	Rotatorio	Cámara digital	Mapeo de corredores, terreno
LSM Q240	<i>RIEGL</i>	Helicóptero Avión	1,500 nm	Más de 4	Rotatorio poligonal	Cámara digital	Terreno, mapeo de corredores, glaciares, nieve.
TopEye Mk II	<i>TopEye</i>	Avión	1,064 nm	Más de 4	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital	Mapeo de corredores, urbano, líneas eléctricas.
Falcon II	<i>TopoSys GmbH</i>	Helicóptero Avión	1560 nm	Sólo 1 (Primero o último retorno)	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital RGB / CIR	Mapeo de corredores, terreno, urbano, forestal, costas, imágenes a color e infrarrojas, clasificación.
Falcon III	<i>TopoSys GmbH</i>	Helicóptero Avión	1,550 nm	Más de 4	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital RGB / CIR	Mapeo de corredores, urbano, inundaciones, forestal, minería a cielo abierto, caminos y carreteras, infraestructura, costas, imágenes a color e infrarrojas, clasificación.
Harrier 24	<i>TopoSys GmbH</i>	Helicóptero	900 nm	Más de 4	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital RGB / CIR	Mapeo de corredores a baja altura, infraestructura, nieve, glaciares, imágenes a color e infrarrojas, clasificación.
Harrier 56	<i>TopoSys GmbH</i>	Helicóptero Avión	1,550 nm	Sólo 1 (Primero o último retorno)	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital RGB / CIR	Mapeo de corredores, urbano, líneas eléctricas, forestal, caminos y carreteras, imágenes a color e infrarrojas, clasificación.
Dragon Eye	<i>AHAB</i>	Helicóptero Avión	1,000 nm	4	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital	Costas, topografía y batimetría simultáneamente.
Hawk Eye II	<i>AHAB</i>	Avión	532 nm batimétrico 1,064 nm topográfico	4	Rotatorio (Fibra óptica)	Cámara digital	Costas, topografía y batimetría simultáneamente.

## II. SENSORES LIDAR (Continuación)

Delta Sphere 3000 IR	<i>3rdtech</i>	ToF	670	360° x 300°	25,000	Cámara digital	Fijo terrestre: escena del crimen, edificaciones, construcciones, industria.
LS 420 HE20 LS 860 HE40 LS 860 HE60 LS 880 HE40 LS 880 HE80 Photon 20 Photon 120	<i>FARO</i>	Fase	785	360° x 320°	120,000	Cámara digital	Fijo terrestre: construcción, monitoreo de infraestructura, minería, escena del crimen, restauración de monumentos, industria.
I-SiTE HDS 4400 CR HDS 4400 LR	<i>Maptek – LeicaGeosystems</i>	Fase	905	360° x 80°	4,400	Cámara digital	Fijo terrestre: monitoreo de infraestructura, instalaciones industriales, edificaciones.
ScanStation 2 HDS Cyrax 2500 Scan Station CD 10	<i>LeicaGeosystems</i>	ToF	1,375-2,750	360° x 270°	50,000	Cámara digital	Fijo terrestre – móvil: escena del crimen, accidentes, infraestructura, edificios, minería, corredores carreteros y urbanos.
HDS 3000	<i>LeicaGeosystems</i>	ToF	532	360° x 320°	25,000	Cámara digital	Fijo terrestre: infraestructura, edificios, minería.
HDS 4000 HDS 4500	<i>LeicaGeosystems</i>	Fase	780	360° x 320°	650,000	-	Fijo terrestre: infraestructura, edificios.
HDS 4400	<i>LeicaGeosystems</i>	ToF	905	360° x 80°	500,000	Telescopio de alineación	Fijo terrestre – móvil: minería de precisión, escena del crimen, accidentes, infraestructura, edificios, minería, corredores carreteros y urbanos.
HDS 6000 HDS 6100	<i>LeicaGeosystems</i>	Fase	1,310	360° x 310°	500,000	Antena WLAN para la captura de datos a distancia remota.	Fijo terrestre – móvil: escena del crimen, accidentes, infraestructura, edificios, minería, corredores carreteros y urbanos.

## II. SENSORES LIDAR (Continuación)

MetricVision	<i>LeicaGeosystems</i>	Fase	1,550	360° x 90°	1,000	-	Fijo terrestre: edificaciones, infraestructura, industria.
ILRIS-3D	<i>Optech</i>	ToF	1,500	360° x 80°	12,000	Cámara digital Antena WLAN para la captura de datos a distancia remota.	Fijo terrestre-móvil: minería, monitoreo de infraestructura, escena del crimen, accidentes, colapsos estructurales de edificios, mapeo de corredores urbanos.
LMP - 321	<i>RIEGL</i>	ToF	750-1,400	360° x 150°	1,000	Cámara digital	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.
GX LMS - Z210 LMS - Z390 LMS - Z420 LMS - Z620	<i>RIEGL</i>	ToF	750-1,400	360° x 80°	12,000	Cámara digital (Nikon D - Canon EOS)	Fijo terrestre : Forestal, minería, restauración de momentos, construcción, edificaciones, arqueología.
VZ-400	<i>RIEGL</i>	Fase	750-1,400	360° x 100°	125,000	Antena WLAN para la captura de datos a distancia remota.	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria, arqueología, restauración de monumentos.
LMS-Q120	<i>RIEGL</i>	ToF	750-1,400	80° x 0°	10,000	-	Móvil terrestre: corredores carreteros y urbanos.
VQ-180	<i>RIEGL</i>	ToF	150	100° x 0°	83,000	-	Móvil terrestre: corredores carreteros y urbanos.
VQ-250	<i>RIEGL</i>	ToF	380	360° x 0°	300,000	-	Móvil terrestre: corredores carreteros y urbanos.
VMX-250	<i>RIEGL</i>	Fase	380	360° x 0°	300,000	-	Móvil terrestre: corredores carreteros y urbanos.
CP 3200	<i>Callidus-Trimble</i>	ToF	905	360° x 280°	1,750	Cámara digital	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.
CP W8000	<i>Callidus</i>	ToF/Fase	658	360° x 300°	50,000	-	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.
Mensi S25 Mensi GS 100 GS101	<i>Trimble</i>	ToF	532	360° x 60°	5,000	Cámara digital Videocámara digital.	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.

## II. SENSORES LIDAR (Continuación)

G5200	<i>Trimble</i>	ToF	532	360° x 60°	5,000	Cámara digital	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.
GX 3D Scanner	<i>Trimble</i>	Fase	532	360° x 60°	5,000	Cámara digital	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.
FX Scanner VX Scanner	<i>Trimble</i>	Fase ToF	1,000 870	360° x 270°	175,000	-	Fijo terrestre: minería, edificaciones, industria.
IMAGER 5003	Z+F <i>Zoller + Fröhlich</i>	Fase	780	360° x 320°	650,000	-	Fijo terrestre: edificaciones, industria, infraestructura, restauración de monumentos.
IMAGER 5006	Z+F <i>Zoller + Fröhlich</i>	Fase	1,000	360° x 310°	500,000	-	Fijo terrestre: edificaciones, infraestructura.
Surphaser 25HSX	<i>Basis Software Inc.</i>	Fase	685	360° x 270°	216,000- 1'000,000	-	Fijo terrestre: edificaciones, industria, infraestructura.
GLS1000	<i>TOPCON</i>	ToF	200-1,000	360° x 70°	3,000	-	Fijo terrestre: edificaciones, industria, restauración de monumentos.
Dynascan	<i>MLD Measurement Device Ltd.</i>	Fase	600	360° x 0°	36,000	-	Fijo terrestre Costas, topografía y batimetría simultáneamente.
Quarryman Pro	<i>MLD Measurement Device Ltd.</i>	Fase	700	360° x 135°	250	-	Fijo terrestre: minería de alta precisión, geología.
Laser ACE LSM	<i>MLD Measurement Device Ltd.</i>	ToF	905	360° x 135°	36,000	-	Fijo terrestre: forestales, construcciones, geología, infraestructura.
HDL-64E	<i>Velodyne</i>	ToF	905	360° x 26.8°	1'800,000	Cámara digital	Fijo terrestre: edificaciones, industria, infraestructura.

\* nm: nanómetros

\*\* FOV expresado en ángulos H x V, ángulo horizontal y ángulo vertical del sensor.

**Nota:** los precios de los sensores varían de un rango de mínimo de \$ 8,000 hasta un máximo de \$ 20,000, con una media de \$ 14,000 dólares estadounidenses aproximadamente.

### III. FORMATOS DIGITALES DE MODELOS LIDAR

FORMATO	COMPAÑÍA O INSTITUCIÓN QUE LO CREÓ
.3DD	<i>Riegl</i>
.PTS .PTX .XYZ	<i>LeicaGeosystems</i>
.BIN .PTC .TS	<i>TerraScan</i>
.CMP .CSD .LXF	<i>Optech</i>
.LAS	<i>ASPRS</i>
.TEW	<i>TopEye</i>
.QTC .QTT	<i>Applied Imagery</i>
.DVZ .LDA .LDI .LDX	<i>RSAC-USDA</i>
.ZFC .ZFS	<i>Zoller+Fröhlich</i>
.XLS	<i>Microsoft</i>

<b>FORMATOS DE IMPORTACIÓN</b>	.00T, .3DI, .3DP, .3DV, .ASC, .CVS, .DAT, .DBF, .DBX, .DGD, .DWG, .DXB, .DXF, .IMP, .IV, .OBJ, .PT, .RAW, .SVY, .TXT, .VML, .WRL, .XML
<b>FORMATOS DE EXPORTACIÓN</b>	.BMP, .DBX, .JPEG, .LANDXML, .PCF, .PTS, .PTX, .SDNF, .SVY, .TIFF, .TXT, .XYZ, .00T, .3DI, .3DP, .3DV, .ARCH_D, .ASC, .DWG, .DXB, .DXF, .DXF, .IMG, .JPG, .MA, .OBJ, .PT, .PTC, .PTS, .PTX, .RLE, .TXT, .VML, .VRML, .ZFC, .ZFS.



#### IV. SOFTWARES DE PROCESAMIENTO LIDAR

	SOFTWARE COMERCIAL	EXTENSIÓN COMERCIAL	FREWARE ACADÉMICO
<b>CAPTURA</b>	<i>IGI WinMP, FLIP7 Fugro, Leica FPES, ALTM NAV, TopEye MPS, Leica FPES, Leica Cyclone Scan, RealWorks Trimble.</i>		
<b>PROCESAR</b>	<i>AEROoffice, GeocodeWF, TerraScan, TerraModeler, Leica ALS Post Processor, Leica ALS Post Processor, RiPROCESS, RiWORLD, TopEye PP &amp; TASQ, TopPIT, Land Survey Studio, Coastal Survey Studio, Leica LCAM Viewer, DASHMap, LASTools, MARS, LiDAR Box, Geocode WF, SceneVision3d, 3D-Extractor FARO Scene, I-SITE Studio, RiScan Pro, RealWorks Survey, 3DIpsos, Z+F Viewer, LFM Modeler, Leica Cyclone, Leica Cyclone II TOPO, Leica Cloudworks, Leica TruView, Cyclone Publisher LASERGen Viewer, LASERGen Distiller, LASERGen SceneManager, CAM2 SPC Graph I-Site Studio Software, I-Site Voidworks Software, Z+F LaserControl, VSF (Visual Sensor Fusion), Z+F ProjectView, 3D Reconstructor, ProcessC3D, SiteMonitor 3D Laser Mapping, PolyWorks.</i>	<i>LAS Reader para ArcGIS 9. Point Cloud for AutoCAD 1.0, LAS Reader para ArcGIS 9. LiDAR Explorer para ArcGIS 9. Point Cloud for AutoCAD 1.0, Leica Cloudworks for AutoCAD, Leica Cloudworks for Microstation, Leica Cloudworks for PDMS, Leica Cloudworks for SmartPlant Review, LASERGen for Microstation and PDS, LASERGen for PDM, LASERGen for AutoCAD, LASERGen for SmartPlant review.</i>	
<b>ANALIZAR</b>	<i>RiANALYZE, MapInfo 8.5 Pro, ENVI 4.3, IDL 6.3, Quick Terrain Modeler 6.0.2 Global Mapper 8.0, MARS Explorer Pro 4.0, MATLAB R2007, QCoherent, LIDAR 1 CuePac 4.0, FME Pro 2007, Surfer, Innovmetric Polyworks, Fledermaus, LASTools, LiDAR Box, Geocode CAM2, Measure X I-Site Forensics Software.</i>	<i>LIDAR Analyst 4.1 (MicroStation, ERDAS Imaging, ArcGIS), PCI Geomatics Lidar Engine 1.0, PCI Geomatics Focus 1.0, TerraScan build, SeisLab para MATLAB, Leica Photogrammetry Suite 9.1, ERDAS Imaging 9.1, ERmapper 7.1, LiDAR Explorer para ArcGIS 9.</i>	<i>FUSION/LDV 2.51, LViz 1.2.0, NOAA Data Handler, LSM3D, QuickGrid, DielmoOpenLiDAR.</i>

## V. NIVELES DE FUSIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURADAS

NIVEL	OBJETIVOS	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLOS	VENTAJAS	LIMITANTES
<b>FUSIÓN A BAJO NIVEL: FUSIÓN DE DATOS</b>	Generar una nueva imagen a partir de un conjunto de datos crudos (generalmente de un mismo sensor).	La fusión de datos puede realizarse en dos formas: - Ráster (pixel). - Vector. También puede darse el caso de la fusión vector-ráster.	Ráster (pixel): imágenes captadas por un sensor óptico satelital o aerotransportado. Vector, la fusión entre diferentes polígonos o puntos. Fusión vector-ráster, de un punto LiDAR con pixel de una imagen (Punto de Color o Punto-Pixel).	Simple. Adecuado para detección de cambios	Es necesaria la correlación entre los datos de los sensores.  La información de los datos antes de la fusión ya no puede ser modelada, debido a la transformación.
<b>FUSIÓN A NIVEL INTERMEDIO: FUSIÓN DE CARACTERÍSTICAS, RASGOS O FIGURAS</b>	Obtener extracciones o segmentación de objetos (geométrica, estructural o espectral) de un mismo o diversos sensores.	Este tipo de fusión permite reconocer patrones característicos o relevantes, como contornos, bordes, líneas, parámetros de textura, etc.	Análisis por componentes principales, redes neuronales y las máquinas de soporte vectoriales.	La detección de cambios es más compleja que el nivel anterior.	La información de los datos antes de la fusión ya no puede ser modelada, debido a la transformación.
<b>FUSIÓN A ALTO NIVEL: FUSIÓN DE DECISIÓN O SIMBÓLICA</b>	Combinar o integrar las decisiones soportados en niveles de confianza.	La decisión se basa en el conocimiento de los expertos.	Votación, métodos estadísticos complejos, bayesianos, booleanos y de aprendizaje automático	La información de los datos antes de la fusión si puede ser modelada posteriormente.	Complejo, es necesario software y algoritmos especializados.

Fuentes: (Hall,Llinas,2001:14-17) (Solberg,2007).

## VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS

**ALS:** Airborne Laser Scanning.  
**ALSM:** Airborne Laser Swath Mapping.  
**ALT:** Airborne LiDAR Topographic.  
**ALTMS:** Airborne LiDAR Terrain Mapping System.  
**AOL:** Atmospheric Oceanographic Lidar  
**ASCII:** American Standard Code for Information Interchange.  
**ASPRS:** American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.  
**ATM:** Airborne Topographic Mapper.  
**CAD:** Computer Assisted Design.  
**FEMA:** Federal Emergency Management Administration.  
**FUGRO:** Ingenieursbureau voor FUnderingstechniek en GROndmechanica.  
**GIS:** Geographic Information System.  
**GLAS:** Geoscience Laser Altimeter System.  
**GPS:** Global Positioning System.  
**HDS:** High Definition Survey.  
**IGI:** Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces.  
**iMAR:** Gesellschaft für inertiële Mess, Automatisierungs und Regelsystem.  
**IMU:** Inertial Measurement Unit.  
**INEGI:** Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.  
**LITE:** Lidar In-space Technology Experiment.  
**LVIS:** Laser Vegetation Imaging Sensor.  
**MPIA:** Multiple Pulses in Air.  
**NASA:** National Aeronautics and Space Administration.  
**NIR:** Near InfraRed.  
**NOAA:** National Oceanic and Atmospheric Administration.  
**PDA:** Personal Digital Assistant.  
**RASCAL:** RAster SCanning Airborne LiDAR.  
**RGNA:** Red Geodésica Nacional Activa.  
**RSAC:** Remote Sensing Applications Center.  
**ScaLARS:** Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor.  
**SLICER:** Scanning LiDAR Imager of Canopies by Echo Recovery.  
**USDA:** United States Department of Agriculture.  
**USGS:** United States Geological Survey.  
**TIC:** Tecnologías de la Información y Comunicación  
**VCL:** Vegetation Canopy Lidar.  
**Z+F:** Zoller +Fröhlich.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airborne imagine, 2009, Floodplain Management: Bare Earth Model - Dry Basin.  
[www.airborneimaginginc.com/images/data\\_samples/Full\\_size/floodplane\\_nowater.jpg](http://www.airborneimaginginc.com/images/data_samples/Full_size/floodplane_nowater.jpg)  
 Visitado 02/05/09.
- Ali, S., Dare, P., Jones, S, 2008, Fusion of Remotely Sensed Multispectral Imagery and LIDAR Data for Forest Structure Assessment at the Tree Level, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences VII ISPRS Congress Beijing 2008*, **XXXVII**, 1089-1094.  
[www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7\\_pdf/6\\_WG-VII-6/07.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7_pdf/6_WG-VII-6/07.pdf)  
 Visitado 12/01/10.
- Alshawabkeh, Yahya, 2005, Using Terrestrial Laser Scanning for the 3D Reconstruction of Petra, Jordan. *Proceedings Photogrammetric Week 05'*, 39-47.  
[www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2005/alshawabkeh05\\_phowo.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2005/alshawabkeh05_phowo.pdf)  
 Visitado 22/11/08.
- Angulo, C., 2001, *Aprendizaje con máquinas núcleo en entornos de multclasificación, Barcelona*, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial, 176 p.
- Arellano, J., Chávez, J., Durón, J., 2005, *Línea de producción LiDAR*, Aguascalientes, Ags., INEGI, 27 p.
- Beraldin, J., 2004, Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond, *Proceedings XXth Congress ISPRS Istanbul*, July 12-23, 12 p.  
[www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm5/papers/188.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm5/papers/188.pdf)  
 Visitado 20/06/08.
- Borges, Jorge Luis, 1999, *El hacedor*, Madrid, Alianza Editorial, 158 p.
- Bruzzone, L., Dalponte, M., Gianelle, D., 2008, Fusion of Hyperspectral and LIDAR Remote Sensing Data for Classification of Complex Forest Areas, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46** (5), 1416-1427.
- Bruzzone, L., Melgani, F., 2004, Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images With Support Vector Machines, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, **42** (8), 778-1790.
- Burtch, R., 2002, Lidar Principles and Applications, *Proceedings IMAGIN Conference*, Michigan, Ferris State University, The Center for Photogrammetric Training, 13 p.  
[www.ferris.edu/faculty/burtchr/papers/lidar\\_principles.pdf](http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/papers/lidar_principles.pdf)  
 Visitado 18/06/08.
- California Institute of Technology, CALTECH, 1998, *Laser safety manual*.  
[www.safety.caltech.edu/manuals/laser\\_safety\\_manual.pdf](http://www.safety.caltech.edu/manuals/laser_safety_manual.pdf)  
 Visitado 18/04/09.
- Cary, T., 2009, Lidar Market: Status and Growth Trends, Cary and Associates, 10 p.  
[www.caryandassociates.com/downloads/cary\\_lidar\\_market\\_status\\_and\\_growth\\_trends.pdf](http://www.caryandassociates.com/downloads/cary_lidar_market_status_and_growth_trends.pdf)  
 Visitado 06/10/09.

- Charaniya, A., 2004, *3D Urban Reconstruction from Aerial LiDAR Data*, California, University of California Santa Cruz, 43 p.
- Chávez, J., 2008, *Generalidades de la tecnología LIDAR*, Aguascalientes, Ags., Presentación INEGI, Julio de 2008.
- Chuvieco, E., 2008, *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*, 3ª edición, Barcelona, Ariel, 597 p.
- Cristianini, N., Shawe-Taylor, J., 2000, *An Introduction to Support Vector Machines*, Cambridge, Cambridge University Press, 189 p.
- Dixon B., Candade, A., 2008, Multispectral land use classification using neural networks and support vector machines: one or the other, or both? *International Journal of Remote Sensing*, **29** (4), 1185 - 1206.
- Dobson, J., 1983. Automated Geography, *The Professional Geographer* **35** (2),135-143.
- Echeverría. J., 2000, *Un Mundo Virtual*, España, Plaza & Janés, 147 p.
- El-Khoribi, R., 2008, Support Vector Machine Training of HMT Models for Land Cover Image Classification, *International Journal on Graphics, Vision and Image Processing*, **8** (4), 7-11.  
[www.icgst.com/gvip/Volume8/Issue4/P1150834318.pdf](http://www.icgst.com/gvip/Volume8/Issue4/P1150834318.pdf)  
Visitado 09/01/10.
- El-Sheimy, N., 2008, Land mobile mapping systems, en *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences:2008 ISPRS Congress Book*, Florida, London, CRC Press, 85-100.
- FARO, 2009,  
[//laser-scanner.faro.com](http://laser-scanner.faro.com)  
Visitado 29/04/09.
- Fernández Beites, P, 2007, Espacio vivido y ciberespacio, *Filosofía y realidad virtual*. César Moreno, Rafael Lorenzo, Alicia Ma. de Mingo (editores), Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza, 119-148.
- Fernandez, J., Singhanía, A., Cáceres, J., Slatton, K., Starek, M., Kumar, R., 2007, *An Overview of Lidar Point Cloud Processing Software*, Florida, Geosensing Engineering and Mapping, University of Florida, 27 p.
- Fowler, R.; Samberg, A., Floud, M., Greaves, T., 2007, Topographic LiDAR, *Digital Elevation Model. Technologies and Applications: the DEM Users Manual*, Maryland, The American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 207-236.
- Früh, C., Zakhor, A., 2001, 3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans, *IEEE Conference on Computer and Pattern Recognition*, Kauai, USA, 31-38.
- Gibson, W., 1984, *Neuromancer*, New York, Ace Books, 271 p.

- Gidudu, A., Hulley, G., Marwala, T., 2007, *Image Classification Using SVMs: One-against-One Vs One-against-All*.  
[//arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0711/0711.2914.pdf](http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0711/0711.2914.pdf)  
 Visitado 09/01/10.
- GIM International Magazine Online, 2009,  
[www.gim-international.com/productsurvey/index.php](http://www.gim-international.com/productsurvey/index.php)  
 Visitado 09/10/09
- Glennie, C., 2009, *Kinematic Terrestrial Light-Detection and Ranging System for Scanning*, *Journal Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **21** (5), 135-141.  
[www.ambercore.com/files/TRBPaper%20ACBrand%20Nov09.pdf](http://www.ambercore.com/files/TRBPaper%20ACBrand%20Nov09.pdf)  
 Visitado 13/12/09.
- Hall, D., Llinas, J., 2001, *Handbook of Multisensor Data Fusion*, Florida, The Electrical Engineering and Applied Signal Processing Series, CRC Press LLC, 572 p.
- Harrap, R., Lato, M., 2008, *An Overview of LiDAR for Urban Applications*, Ontario, Can., GEOIDE Summer School. June 2008, 9 p.
- Holland, J. H., 2004, *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la complejidad*, México, Fondo de Cultura Económica, 197 p.
- Huang, C., Song, K., Kim, S., Townshend, J., Davis, P., Masek, J., Goward, S., 2008, Use of a Dark Object Concept and Support Vector Machines to Automate Forest Cover Change Analysis, *Remote Sensing of Environment* **112** (3), 970-985.
- Ingensand, H., 2006, *Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology*, *Proceedings 3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24, 2006.  
[www.fig.net/commission6/baden\\_2006/PDF/LS1/Ingensand.pdf](http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/LS1/Ingensand.pdf)  
 Visitado 22/11/09.
- International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, Commission V - Close-Range Sensing: Analysis and Applications, 2008-2012.  
[www.commission5.isprs.org](http://www.commission5.isprs.org)  
 Visitado 13/12/09.
- Ivanciuc, O., 2005, The "SVM - Support Vector Machines" Portal.  
[www.support-vector-machines.org/SVM\\_osh.html](http://www.support-vector-machines.org/SVM_osh.html)  
 Visitado 09/10/09.
- Jha, D.K., 2009, *Statistical Mathematics*, New Delhi, India, Discovery Publishing House PVT LTD, 305 p.
- Koch, B., Dees, M., 2008, Forestry applications, *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Book Series in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **7**, 439-465.
- Kurz, T., Buckley, S., Howell, J., Schneider, D., 2008, Geological Outcrop Modeling and Interpretation Using Ground Based Hyperspectral and Laser Scanning Data Fusion, *Proceedings 33rd International Geological Congress*, Oslo, 6-14, August 2008, 1229-1234.

- Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad LVCM, 2007, *Levantamiento con Láser Escáner 3D del Conjunto Histórico de Tossa del Mar*, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.  
[www-cpsv.upc.es/lmvc/memoria/200709%20Tossa%20de%20Mar.pdf](http://www-cpsv.upc.es/lmvc/memoria/200709%20Tossa%20de%20Mar.pdf)  
Visitado 08/01/09.
- Lafarge, F., Descombes, X., Zerubia, J., Pierrot-Deseilligny, M., 2008, Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **63** (3) 365-381.
- Legarrea, M. 2005, *El rayo láser en la Geografía. La resolución marca la diferencia*, México, INEGI.  
[www.ciberhabitat.com.mx/gobierno/lidar/](http://www.ciberhabitat.com.mx/gobierno/lidar/)  
Visitado 28/11/08.
- LeicaGeosystems, 2006, *LeicaGeosystems TruStory: Forensic Analysis by Albuquerque Police Department*, New Mexico.  
[www.leica-geosystems.com/media/new/product\\_solution/Trustory\\_HDS\\_APD\\_final.pdf](http://www.leica-geosystems.com/media/new/product_solution/Trustory_HDS_APD_final.pdf)  
Visitado 22/04/09.
- LeicaGeosystems, 2009,  
[www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs\\_5210.htm](http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs_5210.htm)  
Visitado 29/04/09.
- Lemmens, M., 2007, Airborne LiDAR Sensor: Product Survey, *GIM International* **21** (2), 24-27.  
2009, Airborne LiDAR Sensors, *GIM International*, **23** (2), 16-19.
- Lichti, D., Pfeifer, N., Maas H., 2008, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue "Terrestrial Laser Scanning", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **63**,(1) 1-3.
- Lodha, S., Kreps, E., Helmbold, D., Fitzpatrick, D., 2006, Aerial LiDAR Data Classification Using Support Vector Machines (SVM), *Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06)*, 567-574.
- Lohani, B., 2008, *Airborne Altimetric LiDAR: Principle, Data Collection, Processing and Applications*, Kanpur, Indian Institute of Technology.  
[//home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR\\_Tutorial/Airborne\\_AltimetricLidar\\_Tutorial.htm](http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm)  
Visitado 03/12/08.
- Lopes, A., Nezry E., Touzi, R., Laur, H., 1993, Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images, *International Journal of Remote Sensing*, **14** (9), 1735-1758.
- Lucas, R., Lee, A., Armston, J., Breyer, J., Bunting, P., Carreiras, J., 2008, Advances in forest characterisation, mapping and monitoring through integration of LiDAR and other remote sensing datasets, *Proceedings SilviLaser 2008*, Sept. 17-19, 2008, Edinburgh, UK.  
[//geography.swan.ac.uk/silvilaser/papers/keynote\\_papers/Lucas.pdf](http://geography.swan.ac.uk/silvilaser/papers/keynote_papers/Lucas.pdf)  
Visitado 23/01/09.
- Luhmann, N., 1998, *Sistemas sociales: lineamientos para una teoría general*. México, Santafé de Bogotá, Anthropos, Universidad Iberoamericana, CEJA Pontificia Universidad Javeriana, 445 p.

- Maas, H., 2008, Close range photogrammetry sensors, *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: ISPRS Book Series in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **7**, 439-465.
- Maas, H., Luhmann, T., 2009, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* theme issue "Image analysis and image engineering in Close Range Photogrammetry", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (3), 247.
- McGaughey, R., 2007, *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*, Portland, Pacific Northwest Research Station, December 2007, 117 p.
- NASA 3D-Carbon, 2009.  
[www.carbon3d.uni-jena.de/index.html](http://www.carbon3d.uni-jena.de/index.html)  
Visitado 15/06/09.
- National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, 2008, *Remote Sensing for Coastal Management*.  
[www.csc.noaa.gov/crs/rs\\_apps/sensors/lidar.htm](http://www.csc.noaa.gov/crs/rs_apps/sensors/lidar.htm)  
Visitado 15/03/09.
- Orfeo Toolbox, 2010, *Orfeo Toolbox Software Guide, Updated for OTB 3.2*  
[www.orfeo-toolbox.org/packages/OTBSoftwareGuide.pdf](http://www.orfeo-toolbox.org/packages/OTBSoftwareGuide.pdf)  
Visitado 10/03/10.
- Paul Mrstik, P., Kusevic, K., 2009, Real time 3d fusion of imagery and mobile LiDAR, *Proceedings ASPRS 2009 Baltimore Annual Conference*, March 9-13, 2009.  
[www.asprs.org/a/publications/proceedings/baltimore09/0067.pdf](http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/baltimore09/0067.pdf)  
Visitado 16/08/09
- Remote Sensing Application Center RSAC, 2008, *Introduction to LIDAR: light detection and ranging*.  
[www.fs.fed.us/eng/rsac/lidar/ie5/index.html?dhtmlActivation=window](http://www.fs.fed.us/eng/rsac/lidar/ie5/index.html?dhtmlActivation=window)  
Visitado 14/06/08.
- Reyes, C., 2006, Cybercartography from a Modeling Perspective, *Cybercartography: Theory and Practice*, D.R. Fraser Taylor, (Ed.), Amsterdam, Elsevier, 63-97.
- Reyes, C., Taylor, F., Martínez, E., López-Caloca, F., 2006, Geo-cybernetics: A new Avenue of Research in Geomatics? *Cartographica* **41** (1), 7-20.
- Richter, R., 1990, A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, **11** (1), 159-166.
- RIEGL, 2009, [www.riegl.com/products/terrestrial-scanning](http://www.riegl.com/products/terrestrial-scanning)  
Visitado 29/04/09.
- Roca, J., Marambio, A., 2007, Modelos digitales de nubes de puntos de la Habana Vieja, Cuba. *Proceedings 7th Geomatic Week*. Institut de Geomatica, Catalunya, España.  
[www.cpsv.upc.es/documents/SG7pap138.pdf](http://www.cpsv.upc.es/documents/SG7pap138.pdf)  
Visitado 24/11/08.



- Roth, R. B., Thompson, J., 2008, Practical Application of Multiple Pulse in Air (MPiA) LIDAR in Large-area Surveys, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Beijing 2008 **XXXVII**, 183-188.
- Salah, M., Trinder, J., 2007, *Support Vector Machines: optimization and validation for land cover mapping using aerial images and LiDAR data*, Sydney, Australia, University of New South Wales, School of Surveying and Spatial Information Systems.  
[www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/salah&trinder2009b.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/salah&trinder2009b.pdf)  
Visitado 09/01/10.
- Samberg, Andre, 2007, An implementation of the ASPRS LAS standard, *Proceedings IAPRS XXXVI* (3), 365-372.  
[www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final\\_papers/Samberg\\_2007.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final_papers/Samberg_2007.pdf)  
Visitado 12/02/09.
- Schwarz K., El-Sheimy, N., 2007, Digital mobile mapping systems – state of the art and future trends, *Advances in Mobile Mapping Technology, ISPRS Book Series in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **4**, 3-18.
- Segaran, T., 2007, *Programming Collective Intelligence*, O'Reilly Media Inc., California, 360 p.
- Shakeel, M., 2008, *Land cover classification using Linear Support Vector Machines*, Ohio, Youngstown State University, College of Science, Technology, Engineering and Mathematics, 35 p.
- Shaker, A., Yan, W., 2010, Radiometric calibration of airborne lidar intensity data for land cover classification, *Proceedings The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS*. Calgary, Canada, June 15-18, 2010.  
[www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/03/03\\_01\\_Paper\\_153.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/03/03_01_Paper_153.pdf)  
Visitado 23/09/10.
- Shan, J., Toth, C., 2008, *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Florida, CRC Press, 590 p.
- Shawe-Taylor, J., Cristianini, N., 1999, Data dependent structural risk minimization for perceptron decision trees, *Advances in Neural Information, Processing Systems* **10**, 336-342.
- Simard, R., Bélanger, P., 2006, Airborne Lidar Surveys for Large-Scale Mapping. *GIS Development Malaysia*, (1) 3 July – September 2006.  
[www.gisdevelopment.net/magazine/malaysia/2006/july-sep/images/22\\_6.jpg](http://www.gisdevelopment.net/magazine/malaysia/2006/july-sep/images/22_6.jpg)  
Visitado 13/02/09.
- Sobrino y Rodríguez, J., 2000, *Teledetección*, Valencia, Universidad de Valencia, 475 p.
- Solberg, A., 2007, Data Fusion for Remote-Sensing Applications, *Signal and Image Processing for Remote Sensing*, 515-537.  
[//heim.ifi.uio.no/~inf5300/2008/datafusion\\_paper.pdf](http://heim.ifi.uio.no/~inf5300/2008/datafusion_paper.pdf)  
Visitado 13/02/09.
- Stephens, P., Watt, P., Loubser, J., Haywood, D., Kimberley M., 2007, Estimation of Carbon stocks in New Zealand Planted Forests using Airborne Scanning LIDAR, *IAPRS XXXVI* (3), 389-394.

Support Vector Machines (SMVs) Structural Risk Minimization.

[www.svms.org/srm/](http://www.svms.org/srm/)

Visitado 02/09/2010

Surphaser 3D Laser Scanners, 2009,

[www.surphaser.com/Spec\\_HSX\\_Mar\\_2009.pdf](http://www.surphaser.com/Spec_HSX_Mar_2009.pdf)

Visitado 29/04/09.

Taylor, F., 2003, The concept of cybercartography, *Maps and the Internet*, Amsterdam, Elsevier Science, 405-420.

The British Columbia for Applied Remote Sensing, Modeling and Simulation BC-CARMS, 2006, *LiDAR – Overview of Technology, Applications, Market Features & Industry*, Victoria, Canada, University of Victoria, 49 p.

Toth, C., Grejner-Brzezinska, D., Bevis, M., 2006, High-resolution airborne LIDAR/CCD mapping of San Andreas Fault, *Proceedings 3rd IAG / 12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24, 2006.

[www.fig.net/commission6/baden\\_2006/PDF/PS/Toth.pdf](http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/PS/Toth.pdf)

Visitado 09/05/09.

Townshend, J., Davis, L., Huang, C., 2002, An assessment of support vector machines for land cover classification, *International Journal of Remote Sensing* **23** (4), 725–749.

Tzotsos, A., Argialas, D., 2008, Support Vector Machine classification for Object-Based Image Analysis, *Lectures notes in Geoinformation and Cartography*, Springer, 818 p.

United States Geological Survey, USGS, 2006, *Land-Based Lidar Mapping - a New Surveying Technique to Shed Light on Rapid Topographic Change*.

[//pubs.usgs.gov/fs/2006/3111/fs-2006-3111.pdf](http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3111/fs-2006-3111.pdf)

Visitado 09/12/08.

Universidad de Vigo, 2004, Grupo de Fotogrametría e Teledetección Cercana.

[//webs.uvigo.es/grupotf1/index.htm](http://webs.uvigo.es/grupotf1/index.htm)

Last update: June 4th, 2004.

Visitado 18/06/09.

Universidad Politécnica de Valencia, Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner GIFLE.

[//gifle.webs.upv.es/Investigacion.php](http://gifle.webs.upv.es/Investigacion.php)

Visitado 26/09/09.

Varela F., Maturana, H., 1980, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Dordrecht, Boston, *Boston Studies in the Philosophy of Science*, **42**, 141 p.

Vernon, Z., 2008, *A comparison of Automated Land Cover/use Classification Methods For a Texas Bottomland Hardwood System Using Lidar, Spot-5 And Ancillary Data*. Texas, Texas A&M University, 81 p.

- Vosselman, G., 2009, Advanced Point cloud processing, Stuttgart, *Proceedings Photogrammetrische Woche 2009*, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, 137-146.  
[www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo09/160Vosselman.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo09/160Vosselman.pdf)  
Visitado 22/11/09.
- Wade, S., 2008, Hurricane Katrina: LiDAR to the Rescue. LiDAR map of flooding in New Orleans. *NOAA Marketing Manager, Airborne 1*.  
[www.airborne1.com/newsletter/LiDARKatrina.jpg](http://www.airborne1.com/newsletter/LiDARKatrina.jpg)  
Visitado 22/04/09.
- Wimbush, M., 2008, The Long & Short of It (and the Fast and Gradual) A look at phase-based and time-of-flight scanners. *Point of Beginning Magazine Online*. February 26, 2008.  
[www.pobonline.com/Articles/Article\\_Rotation/BNP\\_GUID\\_9-5-2006\\_A\\_10000000000000270181](http://www.pobonline.com/Articles/Article_Rotation/BNP_GUID_9-5-2006_A_10000000000000270181)  
Visitado 11/03/09.
- Yang, Q., Lia X., Shid, X., 2008, Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines, *Computers & Geosciences*, **34**(6), 592-602.
- Yassine, B., Buckles, B., Yuan, X., Steinberg, L., 2008, A Preprocessing Method for Automatic Breaklines Detection, *Proceedings IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2008*.  
[www.igarss08.org/Abstracts/pdfs/3701.pdf](http://www.igarss08.org/Abstracts/pdfs/3701.pdf)  
Visitado 10/03/09.
- Zhu, H., Yang X., 2008, Classification of multispectral images by using Lagrangian support vector machines. *Proceedings, International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA)*, 28-30 December 2008, Wuhan, China, 1764.

## REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, 1999, *Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO*, escala 1:1,000,000, México,
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI, 2006, *Carta topográfica Rómulo Calzada, E15C38*, escala 1:50,000, México, tercera edición 2004.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI, 2007, *Datos auxiliares de la nube de puntos lidar del Polígono de inundación del Río Grijalva - Presa Peñitas*, México, diciembre 2007 - enero 2008.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI – Instituto Nacional de Ecología INE, 1996, *Uso de suelo y vegetación*, escala 1:1,000,000, México.
- SPOT-5, 2007, *Scene Extract Parameters E090204122017530 - E090204122003958*.